

МІНІСТЕРСТВО НАУКИ І ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



В. Ф. РОЙ,
Ю. П. КРАВЧЕНКО

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ
У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів денної та заочної форм навчання магістерської програми
та слухачів другої вищої освіти за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2019

Рой В. Ф. Електромагнітні процеси у вузлах навантаження високовольтних електричних мереж : конспект лекцій (для студентів денної і заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. Ф. Рой, Ю. П. Кравченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 112 с.

Автори : д-р фіз.-мат. наук, проф. В. Ф. Рой,
канд. техн. наук, доц. Ю. П. Кравченко

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. А. Маляренко

Рекомендовано кафедрою «Систем електропостачання та електроспоживання міст», протокол № 3 від 09.04.2018.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Джерела генерування електромагнітних полів.....	6
1.1 Основні терміни і визначення електромагнітних процесів.....	6
1.2 Типи та класифікація електромагнітних процесів.....	7
1.3 Джерела випромінювання вузькосмугових полів.....	11
1.4 Джерела широкосмугових імпульсних полів.....	12
1.5 Перехідні процеси в мережах електропередач.....	14
1.6 Комутація струму в індуктивних ланцюгах ліній електропередач.....	15
2 МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ.....	16
2.1 Гальванічний механізм впливу через ланцюги живлення.....	17
2.2 Механізм впливу через ємнісний зв'язок.....	20
2.3 Взаємний індуктивний вплив контурів.....	23
2.4 Механізм впливу через електромагнітні поля.....	25
3 МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ.....	27
3.1 Опис періодичних процесів у часовій і частотній і формах.....	27
3.2 Представлення неперіодичних функцій часу у частотній формі...	32
3.3 Спектри періодичних та імпульсних процесів.....	34
3.4 Класифікація середовища по інтенсивності електромагнітних полів.....	37
4 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	37
4.1 Вплив електромагнітних полів на електричні мережі.....	37
4.2 Вплив електромагнітних полів на лінії зв'язку.....	38
4.3 Вплив полів на систем релейного захисту і управління.....	39
4.4 Імпульсні поля при перехідних процесах в ланцюгах ВН.....	40
4.5 Імпульсні електромагнітні поля при ударах блискавки.....	42
5 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	44
5.1 Вплив кривої форми струму на роботу електрообладнання.....	44
5.2 Вплив гармонік на роботу систем електропостачання.....	45
5.3 Вплив гармонік на системи релейного захисту	50
5.4 Вплив гармонік на роботу електроспоживачів.....	51
6 КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ НА ОБ'ЄКТІ.....	52
6.1 Задачі контролю електромагнітної обстановки.....	52
6.2 Методи визначення інтенсивності електромагнітних полів.....	55
6.3 Механізм впливу електромагнітних полів на персонал.....	59
6.4 Нормування безпечних для людини напруженості полів.....	63
6.5 Нормування умов роботи персоналу в зоні впливу ПЛ.....	66
6.6 Екологічний вплив коронного розряду	69

7 МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ	
ПОЛІВ.....	74
7.1 Способи обмеження рівня гармонік напруг і струмів.....	74
7.2 Фільтри.....	75
7.3 Захист котушок індуктивності.....	85
7.4 Обмежувачі перенапруг.....	94
7.5 Екранування обладнання.....	98
7.6 Захист ліній зв'язку редуційними трансформаторами.....	106
7.7 Застосування роздільних елементів.....	107
СПИСОК ДЖЕРЕЛА.....	109
ДОДАТКИ.....	110

ВСТУП

До електромагнітних процесів (ЕМП) відносять такі явища, як випромінювання радіохвиль, що впливають на мережі електропередач, перенапруги, які виникають при комутації обладнання або атмосферних явищ, паразитні зв'язки між елементами електрообладнання, фон промислової частоти, вплив заземлення та ін. Згідно стандарту VDE 0870 ЕМС високовольтне обладнання повинне надійно функціонувати із заданою якістю в даній електромагнітній обстановці і при цьому не створювати неприпустимих рівнів електромагнітних перешкод іншим технічним пристроям.

Основними об'єктами створення ЕМП у вузлах навантаження високовольтних електричних мереж є передавачі та приймачі електромагнітної енергії, до яких відносяться електричні мережі, радіо- та телевізійні передавачі, електроприймачі та інші електричні прилади та системи.

На об'єктах електроенергетики джерелами електромагнітного впливу на автоматичні та автоматизовані системи управління технологічними процесами є:

- електричні та магнітні поля промислової частоти, створені силовим обладнанням станцій та підстанцій;
- розряди статичної електрики;
- перехідні процеси в ланцюгах високої напруги при коротких замиканнях, спрацюванні розрядника або обмежувача перенапруги;
- перехідні процеси в ланцюгах високої напруги при комутаціях силовими вимикачами та роз'єднувачами;
- перехідні процеси в заземлюючих пристроях підстанцій, зумовлені струмами КЗ промислової частоти та струмами блискавок;
- швидкі перехідні процеси при комунікаціях в індуктивних ланцюгах низької напруги;
- перехідні процеси в ланцюгах різних класів напруги при ударах блискавки по самому об'єктові або поряд з ним;
- електромагнітні збурення в ланцюгах оперативного струму.

Прикладами передавачів електромагнітних збуджень є колекторні електродвигуни, силова електроніка, зварювальні апарати, автомобільні пристрої запалювання, люмінесцентні лампи, електроінструмент та ін. В окремих випадках розглядаються такі види електромагнітних збуджень як:

- джерела електромагнітних завад на електричних станціях і підстанціях;
- магнітне поле Землі при аномальних проявах на поверхні Сонця;
- електромагнітні імпульси ядерних вибухів.

До приймачів електромагнітних збуджень відносяться:

- засоби релейного захисту і автоматики;
- керовані прилади і регулятори;
- системи автоматизації;

- пристрої обробки інформації;
- силові електроприймачі;
- автомобільна мікроелектроніка;
- теле- і радіоприймачі тощо.

Багато з електричних пристроїв можуть одночасно бути як приймачами так передавачами електромагнітної енергії.

Як видно з вищесказаного, електричні пристрої вважаються сумісними з електричними мережами, якщо вони в якості передавачів є джерелом електромагнітних перешкод не вище допустимих, а в якості приймача мають допустиму чутливість до них.

Електромагнітні явища можуть викликати як зворотні так і незворотні порушення в роботі електрообладнання високої напруги. В якості зворотних порушень можна вважати шумовий фон при телефонній розмові. До незворотних порушень відносяться збої в роботі системи релейного захисту та автоматики, які призводять до відключення системи електропостачання.

1 ДЖЕРЕЛА ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

1.1 Основні терміни та визначення електромагнітних процесів

1.1.1 Джерело випромінювання – джерело штучного або природного походження, що випромінює електромагнітні поля.

1.1.2 Електромагнітна емісія – це генерування джерелом випромінювання електромагнітної енергії.

1.1.3 Електромагнітна перешкода – електромагнітне явище або процес, які можуть погіршити якість функціонування технічного пристрою.

1.1.4 Рівень випромінювання – рівень електричного або магнітного поля або щільності потоку потужності, що його випромінює технічний пристрій, який виміряний в регламентованих умовах.

1.1.5 Електромагнітна кондукція – явище або процес, при якому перешкода розповсюджується від джерела кондуктивним шляхом в провідному середовищі.

1.1.6 Кондуктивна перешкода – електромагнітна перешкода, що розповсюджується по проводах.

1.1.7 Електростатична перешкода – перешкода обумовлена електризацією у вигляді імпульсних струмів накопичених електростатичних розрядів.

1.1.8 Комутаційна перешкода – індустріальна перешкода, яка виникає при комутаціях струму та напруги.

1.1.9 Контактна перешкода – електромагнітна перешкода обумовлена випромінюванням струмопровідних контактів і середовища з нелінійною провідністю при дії на них електромагнітного поля.

1.1.10 Індустріальна перешкода – електромагнітна перешкода, створювана технічними засобами.

1.1.11 Допустима перешкода – електромагнітна перешкода, при дії якої функціонування технічного засобу зберігається на заданому рівні.

1.1.12 Вплив перешкоди – зниження показників функціонування технічного засобу під дією електромагнітної перешкоди.

1.1.13 Рівень перешкоди – величина електромагнітної перешкоди, виміряна в регламентованих умовах.

1.1.14 Норма на перешкоду – регламентований максимально допустимий рівень перешкоди.

1.1.15 Рівень емісії – величина електромагнітної перешкоди, вимірної в регламентованих умовах.

1.1.16 Рецептор – технічний засіб, який реагує на електромагнітний сигнал.

1.1.17 Зона впливу – ділянка простору, в межах якої рівень електромагнітної перешкоди перевищує допустимий.

1.1.18 Поріг чутливості – мінімальна величина електромагнітної перешкоди, на яку реагує рецептор.

1.1.19 Завадозахищеність – спроможність послаблювати вплив електромагнітної перешкоди за допомогою засобів захисту від перекод.

1.1.20 Аналізатор перешкод – прилад, що містить систему часової селекції.

1.1.21 Вимірювач перешкод – селективний мікровольтметр з регламентованою величиною відношення синусоїдальної напруги до спектральної щільності напруги імпульсів на вході, що призводить до однакового показника вимірювального приладу, який містить інерційні детектори.

1.1.22 Електромагнітна обстановка – це сукупність електромагнітних явищ, процесів у даній ділянці, частотному та часовому діапазонах.

1.1.23 Електромагнітна сумісність (ЕМС) технічних засобів – це спроможність технічного пристрою функціонувати із заданою якістю в даній електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних перешкод іншим технічним засобам.

1.2 Типи та класифікація електромагнітних процесів

Джерела випромінювання полів поділяються на функціональні і не функціональні. Функціональні – це, насамперед, радіо- і телепередавачі, генератори ВЧ коливань, промислові і медичні мікрохвильові печі, радіокеруючі пристрої та ін.

Не функціональні – це електричний транспорт, розрядні лампи, комутаційні процеси в лініях високої напруги (ВН), контактні та безконтактні перемикачі, атмосферні та коронні розряди, розряди статичної електрики, використання потужних імпульсів в технологічних процесах та ін.

Досягнення ЕМС функціональних джерел перешкод закладено в їх конструкції, в той час, як для не функціональних джерел – ця проблема потребує спеціального вирішення в кожній конкретній ситуації.

Основною задачею при цьому є виявлення джерела перешкод та визначення їх параметрів і механізмів зв'язків, що дозволить забезпечити електромагнітну сумісність за допомогою відповідних заходів.

Всі джерела випромінювання поділяються на вузькосмугові та широкосмугові. Перешкоди, які створюються джерелами (напруг, струмів, електричних і магнітних полів), можуть виникати як у вигляді періодично повторюваних, так і у випадково зосереджених в часі величин. В обох випадках мова йде про вузькосмугові, або і широкосмугові електромагнітні процеси.

Процес називається вузькосмуговим, якщо енергія спектру зосереджена у відносно вузькій смузі частот біля деякої фіксованої частоти ω_0 , або широкосмуговим, – якщо вказана умова не виконується.

При систематизації, в першому наближенні, незважаючи на безкінечну кількість варіантів, розрізняють чотири типи завад. Характерні приклади їх приведені на рисунку 1.1.

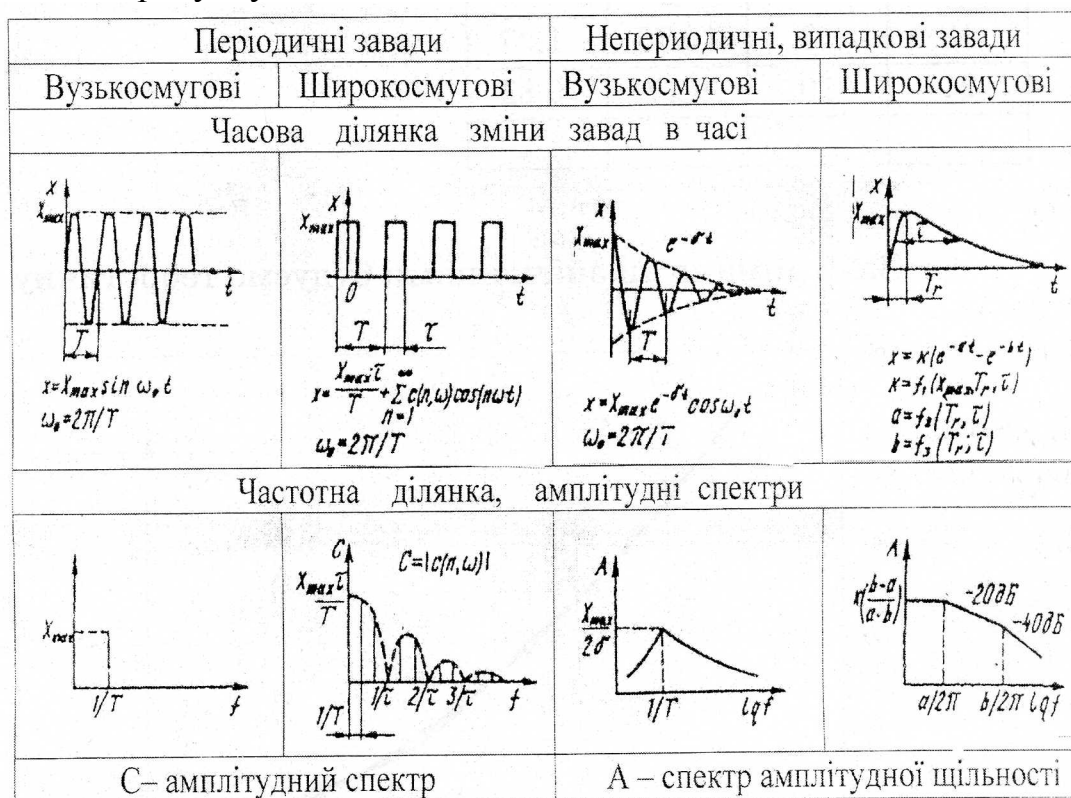


Рисунок 1.1 – Типи електромагнітних процесів

Виділяють такі типи електромагнітних процесів:

– синусоїдальні, – постійно діючі періодичні процеси частотою 50 Гц, які проникають із системи живлення, або високочастотні несучі хвилі. Їх поля мають спектральну щільність, яка характеризується двома лініями виду

$$X(\omega) = X_{max} [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \quad (1.1)$$

та являють собою вузькосмуговий процес;

– послідовність прямокутних імпульсів, яка може виражатися у формі ряду Фур'є, і є прикладом широкосмугового процесу з дискретним спектром:

$$X(\omega) = \frac{X_{\max} \cdot \tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n, \omega t), \quad \omega_0 = 2\pi/T \quad (1.2)$$

– періодичні одноразові затухаючі імпульси, що виникають в системі електрозабезпечення та являють собою вузькосмуговий процес;

$$X(\omega) = X_{\max} e^{-\delta t} \cos \omega_0 t \quad (1.3)$$

– поодинокі імпульси, утворені двома експонентами (наприклад, атмосферні або електростатичні розряди) і є широкосмуговим процесом.

$$X(\omega) = X(e^{-\delta t} - e^{-st}) \quad (1.4)$$

$$X(\omega) = f_l(X_{\max} T_r \tau)$$

Синфазні та протифазні поля. Синфазні напруги виникають між кожним проводом і землею (u_{c1}, u_{c2} , (рис. 1.2) і діють на ізоляцію проводів відносно землі. Синфазні напруги обумовлені в основному різницею потенціалів в ланцюгах заземлення пристрою, та при аварійних замикань високовольтних ліній на землю робочими, або струмами блискавки.

Протифазні напруги перешкод u_d (рис. 1.2) виникають між проводами двохпроводної лінії. Протифазні напруги виникають через гальванічні або польові зв'язки, або ж перетворюються із синфазних напруг в системах. Протифазні напруги перешкод накладаються на корисні сигнали в сигнальних ланцюгах, або на напругу живлення в мережах електрозабезпечення та можуть бути прийняті як корисні сигнали в пристроях автоматизації і спровокувати збій в роботі системи.

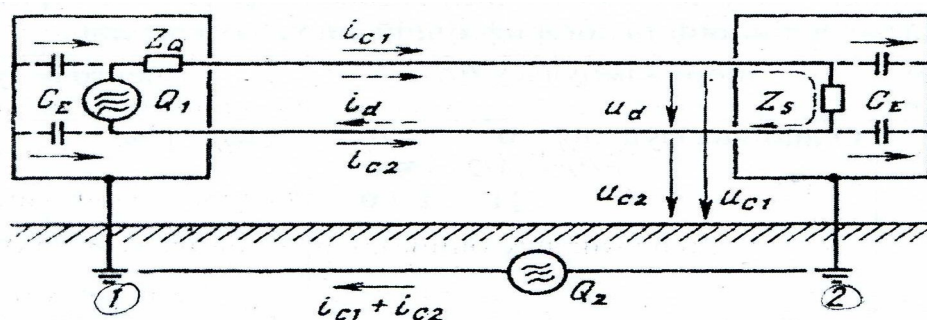


Рисунок 1.2 – Перешкоди, пов'язані з передачею сигналів по проводам:

C_E – паразитні ємності відносно заземленого корпусу; Q_1 – джерело протифазних перешкод; Q_2 – джерело синфазних перешкод;

i_{c1}, i_{c2} – синфазні струми; i_d – протифазний струм;

u_{c1}, u_{c2} – синфазні напруги перешкод; u_d – протифазна напруга перешкод;

$Z_{Q,S}$ – повні опори джерела і приймача перешкод

Джерела електромагнітних полів класифікуються по їх спектру випромінювання на вузько- та широкосмугові (рис. 1.3).

Для кількісної оцінки визначення спектрів випромінювання вводять поняття енергетичного спектра імпульсного або періодичного процесу.

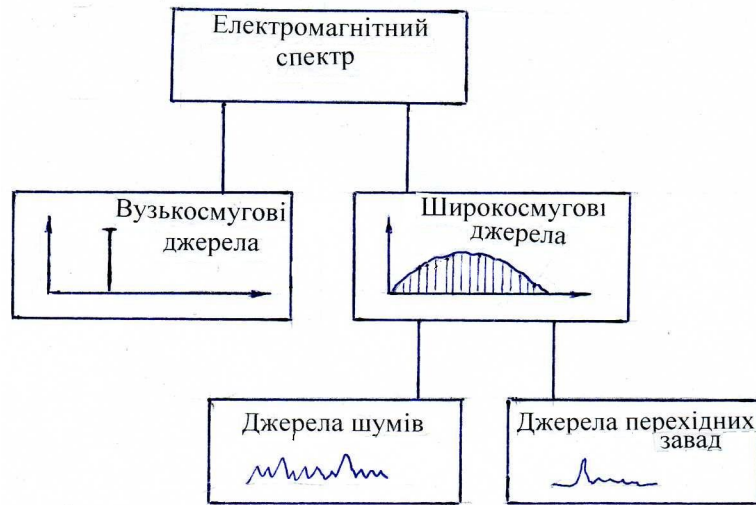


Рисунок 1.3 – Розподіл передавачів на вузько смугові та широкосмугові

Для імпульсного процесу енергетичний спектр визначається

$$F(\omega) = \frac{2}{T} |\dot{X}(\omega)|^2 \quad (T - \text{тривалість імпульсу}) \quad (1.5)$$

Для періодичного процесу

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2} |\dot{C}_n|^2 \delta(\omega - n\omega_o) \quad (1.6)$$

(де $\varepsilon = 2$ при $n = 0$ і $\varepsilon = 1$ при $n = 1$).

Якщо енергетичний спектр має максимум $F(\omega_o)$ при частоті ω_o – тоді *шириною полоси* енергетичного спектру називають площу під кривою спектра, віднесеною до величини енергетичного спектра на частоті ω_o :

$$\Delta_{\Pi} = \frac{1}{2\pi F(\omega_o)} \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega. \quad (1.7)$$

Це можна трактувати як ширину рівномірного в смузі Δ_{Π} енергетичного спектра процесу, еквівалентного даному по середній потужності.

Тоді умова вузькосмуговості процесу визначається кількісно, як $\omega_o \gg \Delta_{\Pi}$.

Джерела широкосмугових полів мають спектр з щільно розташованими спектральними лініями (безперервний спектр). Вони поділяються на джерела шумових і перехідних перешкод.

Шумові перешкоди складаються з багатьох щільно розташованих імпульсів різної амплітуди, які неможливо розділити (рис. 1.3).

Перехідні перешкоди чітко відрізняються одна від одної, мало повторюються і мають вигляд імпульсів.

Широко смугові сигнали розрізняються і по когерентності. При когерентних широко смугових сигналах реакція приймача пропорційна ширині його смуги, в той час для некогерентних сигналів, спектральні складові яких співвідносяться довільно, реакція приймача пропорційна квадратному кореневі ширини його смуги.

1.3 Джерела вузько смугових полів

Зазвичай такі джерела являються штучно створеними – це, наприклад, радіопередавачі, які на відповідних частотах випромінюють великі потужності. Вони випромінюють вищі гармоніки завдяки нелінійності елементів передавачів, медичні і промислові ВЧ генератори, або просто мережа частотою 50 Гц. Такі джерела полів характеризуються амплітудою або діючою величиною перешкоди на відповідній частоті.

Передавачі зв'язку генерують електромагнітну енергію з метою передачі або отримання інформації і випромінюють її в навколишній простір. Передавачі зв'язку поділяють на п'ять груп (табл. 1.4).

Дозволені потужності полів на відповідних частотах встановлені в залежності від регіонального розташування та часу направленості передач за погодженням з Міжнародною телекомунікаційною спілкою (ITU). У передавачів, що працюють на однаковій частоті, ЕМС досягається просторовим віддаленням або обмеженням радіусу дії. При вводу в дію нового передавача необхідний дозвіл влади, виданий на основі перевірки та доказу про його ЕМС. Випромінювання передавачів зв'язку зазвичай вузько смугові і часто містять несучу частоту, бокові смуги а також гармонічні і негармонічні вищі складові.

Діапазон роботи передавачів зв'язку – від декількох десятків Гц, до декількох сотнів ГГц.

Таблиця – Класифікація передавачів зв'язку

Комерческі передавачі	Радіотелефони	Направлений радіозв'язок	Навігація	Локатори
Радіо АМ	Автомобільні радіотелефони	Супутниковий радіозв'язок	Повітряне сполучення	Повітряне сполучення
Радіо ЧМ	Радіополіція	Наземні релейні станції	Судноплавство	Судноплавство
Телебачення ВЧ	Радіо СВ		Радіоточка	Транспортні локатори
Телебачення У КВ	Аматорські радіопередавачі		LORAN	Контроль повітряного транспорту
	Виробничі радіотелефони			

Генератори високої частоти. В промисловості, медицині, домашньому господарстві та науці використовують значну кількість високочастотні (ВЧ) генераторів великої та середньої потужності для індукційного нагріву, плавлення, електротерапії, прискорення елементарних часток (циклотрони, синхротрони) та ін.

Усі ці прилади виробляють високочастотну енергію для отримання локального електрофізичного ефекту, тому вони відносяться до групи функціональних передавачів.

Більшість ВЧ пристроїв функціонують на дозволених частотах в діапазоні від 1 до 200 МГц при достатньому екрануванні. Крім того, при наявності випромінювання, необхідно забезпечити ЕМС установки з середовищем знаходження людей.

Радіоприймачі. Комп'ютери. Комутаційні пристрої. Всі розглянуті прилади для виконання своїх функцій мають особисті генератори, які через вхідні і вихідні проводи, шасі і корпуси випромінюють електромагнітну енергію в зовнішнє середовище. Діапазон робочих частот – від сотні кГц до декілька десятків МГц.

В радіо- та телеприймачах частоту вхідного ВЧ сигналу змішують з частотою гетеродіну, утворюючи проміжну частоту, внаслідок чого випромінюється як частота гетеродина, так і постійна проміжна частота разом з вищими гармоніками. Проміжна частота при амплітудній модуляції складає 455 кГц, при частотній модуляції – 10,7 МГц.

Комп'ютери випромінюють перешкоди від таймера центрального процесора, а також периферійних приладів (принтери, термінали).

Комутаційні пристрої генерують перешкоди при частотах, більших за 16 кГц в результаті випромінювання як на основній частоті, так і гармоніках.

Випромінювання перелічених приладів не повинне перевищувати допустимі рівні радіоперешкод, згідно нормативних документів. Це досягається шляхом збільшення відстані та просторової орієнтації їх компонентів.

1.4 Джерела широкосмугових імпульсних полів

У містах спостерігається високий рівень широкосмугових перешкод, обумовлений міськими транспортними магістралями, системами запалювання у автотранспорті, домашніх електроприладах, розрядних лампах, приладах цифрової техніки. В національних стандартах наведені рівні перешкод, які відрізняються на 20÷40 дБ, в залежності від виду транспорту та рівня загальної щільності руху.

Прикладом типових джерел широкосмугових перешкод є автомобільні пристрої запалювання, у яких при перериванні первинного струму $i_1(t)$ в котушці запалення виникає зміна струму $di_1(t)/dt$. При цьому у вторинній обмотці, за рахунок зміни магнітного потоку $d\Phi(t)$, індуктується високовольтний імпульс $u_2(t)$, який призводить до швидкої зміни напруги

на проводах запалення $u(t)/dt$. Струм зміщення $i_{zm} = C_{nap} du_2(t)/dt$ через паразитні ємності наводить в сусідніх контурах і провідниках напругу перешкоди. При розриві струму розподільовачем в ланцюгах запалення, завдяки розряду ємності вторинної обмотки, знову виникає швидка зміна напруги і струму, яка за рахунок індукції і взаємного впливу створює перешкоди. Типові щільності амплітуд перешкод по напруженості електричного поля поблизу міських вулиць знаходяться в межах -20 і $+20$ дБ мкВ/м/кГц. Частоти перешкод досягають гігагерцового діапазону.

Іншим широко розповсюдженим джерелом імпульсних перешкод є розрядні лампи, які запалюються за допомогою спеціального пуско-регулювального апарату (ПРА), який містить індуктивність і комутуючий пристрій. (рис. 1.5). В момент розриву ланцюга струму, в котушці індуктивності виникає напруга самоіндукції $L di(t)/dt$ у декілька кіловольт, яка запалює розряд в лампі. Причому, перешкоди створюються не тільки в момент запалювання розряду, але і в процесі роботи лампи внаслідок її періодичного погасання і знову запалення з частотою 50 Гц, створюючи перешкоди радіоприйому в діапазоні середніх і довгих хвиль.

Електронні ПРА містять генератор ВЧ ($30 \div 50$ кГц), робота якого супроводжується присутністю вищих гармонік струму живлення: 90% – третя, 75% – п'ята, 60% – сьома гармоніка які, згідно вимогам стандарту, повинні зменшуватися шляхом їх фільтрації до допустимих значень.

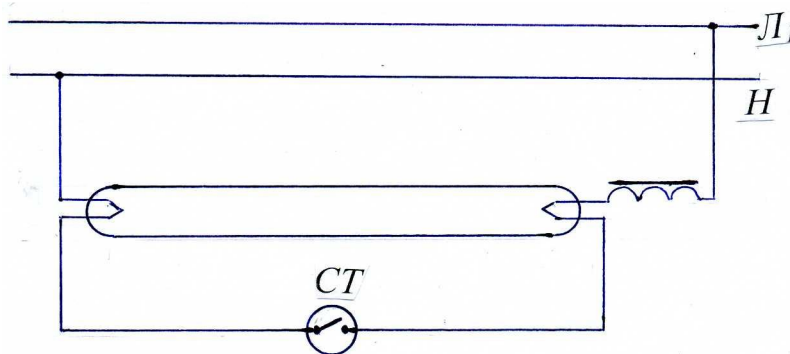


Рисунок 1.5 – Схема ввімкнення люмінесцентної лампи з котушкою індуктивності і стартером тліючого розряду

Розрядні лампи високого тиску створюють значні перешкоди в діапазоні високих і надвисоких частот завдяки швидкому пробію розрядного проміжку при високому тиску і малим відстаням між електродами.

У електричних колекторних двигунів в обмотках і провідниках відбувається швидка зміна струмів. При відході щітки від краю колекторної пластини струм підтримується через електричну дугу (іскріння щіток), при обриві якої, відбувається швидка зміна струму $di(t)/dt$, яка індукує в

катушках індуктивності напругу самоіндукції $Ldi(t)/dt$, а також у сусідніх проводах напругу взаємної індукції $Mdi(t)dt$.

Для локального обмеження перешкод вмикають послідовно катушки індуктивності, які індукують в обмотках якоря протидіючу напругу, а паралельно щіткам – конденсатори.

1.5 Перехідні процеси в мережах електропередач

Перехідні процеси в мережах низької напруги. Перенапруження виникають зазвичай при ввімкненнях індуктивних споживачів, а також при включенні ємнісного навантаження, і при спрацьовуванні вимикачів захисту і запобіжників, при КЗ, перемиканнях в навантажених мережах та атмосферних розрядах.

Завдяки різним типам і внутрішнім опорам мереж максимальна (амплітудна, пікова) величина напруги U , крутизна dU/dt і кількість енергії в перешкоді коливаються в широких межах. При повному опорі енергія перешкоди розраховується за формулою

$$W = \int \frac{U_n^2}{R} dt. \quad (1.8)$$

Високі перенапруження в проводах низької напруги швидко згасають по амплітуді і по крутизні, що суттєво зменшує їх негативний вплив.

Перехідні процеси в мережах високої напруги. В розподільних пристроях при замиканні і розмиканні роз'єднувачів виникають численні повторні запалення, які спроможні створити у вторинних пристроях перенапруження до 20 кВ, що може призвести до спрацьовування захисту, або пошкодження елементів мереж.

Швидкі позитивні і негативні зміни потенціалу ділянки лінії визивають струми зміщення через паразитні ємності відносно сусідніх проводів $i = C_{\text{нар}} dU/dt$, максимальна величина яких, внаслідок значної крутизни зміни напруги, може приймати великі значення. Обумовлені струмом заряду лінії і струмом зміщення магнітні поля індукують в сусідніх контурах напругу перешкод. Якщо час пробігу хвилі в розімкненій лінії більший, за час розвитку повторних запалювань, то при кожному пробії виникають хвилі напруги і струму, які відбиваються на кінці лінії і наводять в паралельних проводах напруги і струми перешкод.

При розмиканні роз'єднувачів відбуваються аналогічні процеси, але амплітуда зміни потенціалу або хвиль при збільшенні відстані між контактами може набути подвійного максимального значення.

Комутаційні процеси в елегазових розподільних пристроях супроводжуються хвилями, які внаслідок нерівномірності хвильового опору частково відбиваються і навіть можуть виходити зовні (рис. 1.6). При підключенні короткої ненавантаженої лінії до загальної шини при зближенні контактів, відбувається першій пробій, і лінія набуває потенціалу шини.

Якщо струм зменшився, то дуга обривається, але ділянка лінії зберігає свій потенціал, тому відбувається другий пробій, якщо миттєве значення змінної напруги шини відрізняється від лінії на величину пробою. Процес буде повторюватись до повного з'єднання контактів.

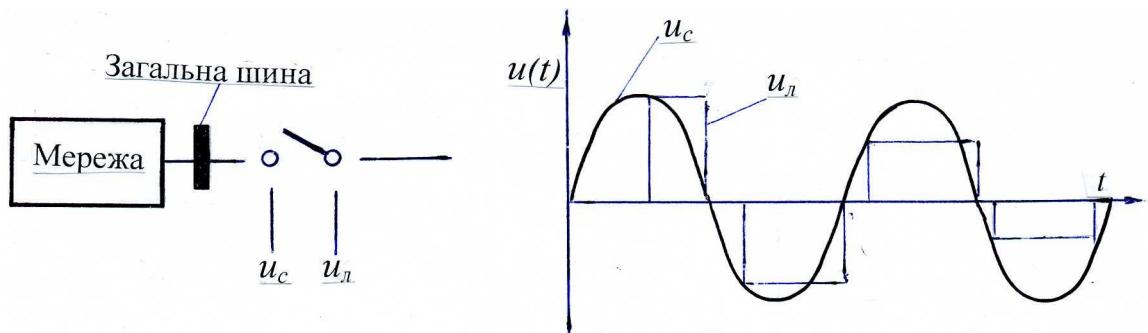


Рисунок 1.6 – Виникнення перенапруг при включенні короткої ненавантаженої лінії

На поверхні проводів ліній високої та надвисокої напруги (НВН) напруженість електричного поля може перевищувати на деяких ділянках величину електричної міцності повітря, внаслідок чого виникають часткові розряди (ЧР), які утворюють поблизу проводу коронний розряд. ЧР супроводжуються імпульсами струму з тривалістю зростання та спаду в декілька пікосекунд, що призводить до розповсюдження вздовж проводів електромагнітних хвиль. Імпульси цих розрядів утворюють джерело шумових перешкод, які призводять до порушення радіозв'язку в діапазоні до ультрависоких частот.

Іншим джерелом перешкод є іскрові розряди між нещільно приєднаними металевими частинами обладнання, або металевими частинами і поверхнею ізолятора. Спектр таких іскрових розрядів досягає надвисоких частот і заважає, насамперед, роботі телеприймачів.

Радіоперешкоди ліній електропередач (ЛЕП) ВН сильно залежать від погоди і форми верхньої частини опор.

Електромагнітний імпульс блискавки. Блискавка і пов'язані з нею перехідні процеси здійснюють сильний електромагнітний вплив поблизу місця удару. Максимальні параметри струму блискавки:

- максимальний струм $I_{max} = 200 \text{ кА}$;
- крутизна зростання струму за 100 нс $di/dt = 300 \text{ кА/мкс}$;
- крутизна зростання струму за 1 мкс $di/dt = 150 \text{ кА/мкс}$;
- заряд $Q = \int di/dt = 500 \text{ Кл}$;
- інтеграл квадрата струму $\int i^2 dt = W/R = 10^7 \text{ А}^2/\text{с}$.

Для внутрішнього захисту від блискавки згідно рівнянь Максвелла можна розрахувати електричні і магнітні поля, обумовлені струмом блискавки або її частковими струмами в заземленні, а також індуковані ними струми у вторинних ланцюгах з врахуванням ряду факторів: віддалення від місця удару, характеристики споруд та ін.

1.6 Комутація струму в індуктивних ланцюгах ліній

При відключенні котушок індуктивності, які широко використовуються в пристроях автоматичного керування та контролю (котушки реле і котушки контакторів), виникають високі перехідні перенапруження, які можуть призвести до їх повторного включення, пробоя ізоляції, а також до електромагнітних впливів на компоненти мереж. Причому механізм виникнення перешкод при вимиканні і вмиканні – різний. При розмиканні індуктивного ланцюга зі струмом контакти які розходяться призводять до зміни струму – di/dt , що пов'язано зі зміною магнітного потоку – $d\Phi/dt$, який в результаті самоіндукції індукує напругу в ланцюгу струму. Ця напруга прикладена до контактів і підтримує комутаційну дугу.

Найбільший вплив виникає внаслідок обриву струму, коли розпад дуги і швидке зростання напруги на проміжку при розведених контактах примушує струм падати до нуля з великою крутизною di/dt . В результаті електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції досягає навіть у контактів низької напруги декількох кіловольт.

При ввімкненні індуктивних ланцюгів, коли контакти наблизились на відповідну відстань, відбувається пробій повітряного проміжку, який при вібрації контактів багатократно повторюється. Перешкоду створює не сама іскра, а її зникнення (обрив струму) або поява (електричний пробій з повторним запаленням дуги), що супроводжується крутими фронтами зміни струму. Магнітна енергія накопичується в індуктивності L до початку відключення і дорівнює: $W_m = \frac{1}{2}LI^2$. При розімкненому вимикачеві струм котушки L замикається через ємність котушки $C_{пар}$ (рис. 1.7). Ця енергія переходить з індуктивності в ємність і знову в індуктивність. Приблизну максимальну напругу оцінимо за формулою

$$W = \frac{1}{2}C_{пар}U_{\max}^2 = \frac{1}{2}LI^2. \quad (1.9)$$

Перенапруження в комутаційних індуктивних ланцюгах є найбільш розповсюдженою причиною перешкод в електронних пристроях управління.

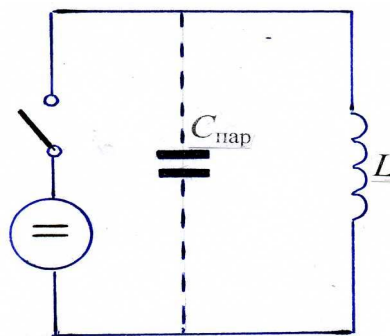


Рисунок 1.7 – Визначення максимальної величини напруги самоіндукції в індуктивному ланцюгу з врахуванням паразитної ємності котушки

2 МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1 Гальванічний вплив через ланцюги живлення

На рисунку 2.1 наведені 4 можливі механізми впливу контуру, що є джерелом полів Q до іншого S , який є їх приймачем. Такий вплив може здійснюватись по проводам або через поле. В першому випадку – це через гальванічний зв'язок, а в другому – через внутрішній або зовнішній ємнісний зв'язок (якщо переважає електричне поле), або індуктивний (якщо переважає магнітне поле). Також використовують поняття електромагнітного зв'язку, при якому між напруженістю електричного і магнітного полів існує співвідношення $E/H = 377 \text{ Ом}$.

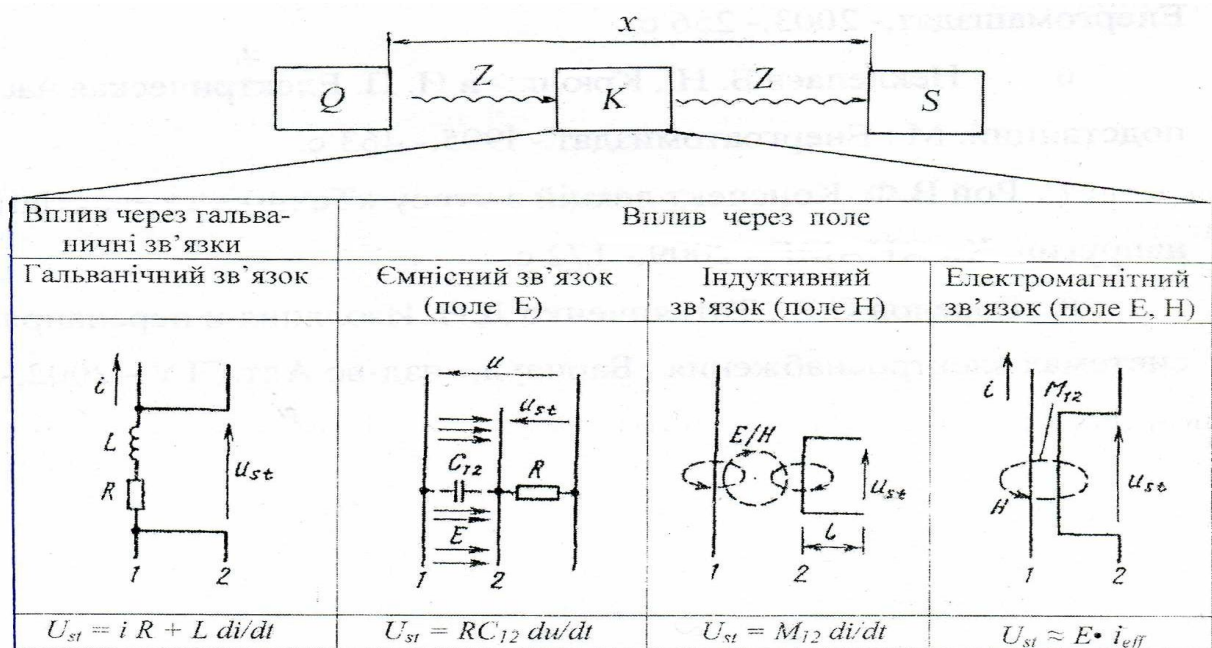


Рисунок 2.1 – Механізми впливу джерела перешкод між контурами:
 1, 2 – контури генеруючий і приймаючий; i_{eff} – ефективна довжина антени;
 u_{st} – наведена напруга перешкоди

Гальванічний вплив може здійснюватись через загальні повні опори, через опори мережевих проводів або через систему захисних і заземлюючих проводів.

На рисунку 2.2 показана схема живлення постійною напругою логічних модулів, в якій при зміні струму одного з них (di/dt) генерується напруга перешкоди u_{st} , завдяки падінню напруги на R і L , яка накладається на напругу живлення. При цьому величина напруги перешкоди

$$u_{st} = R \Delta i + L \Delta i / \Delta t. \quad (2.1)$$

Ця напруга при заданих Δi і $\Delta i / \Delta t$ тим нижча, чим менші параметри повних опорів загальних ланцюгів і зазвичай складає вольти або мілівольти.

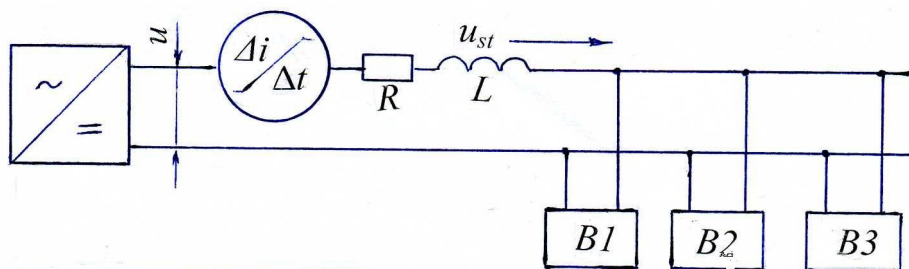


Рисунок 2.2 – Приклад гальванічного зв'язку в ланцюгу електроживлення:
 R – активний опір провідника; L – індуктивність мережі

Оскільки активний опір провідника дорівнює

$$R = l / \rho \cdot F, \quad (2.2)$$

де l – довжина провідника; F – площа поперечного перерізу; ρ – питома електрична провідність, тому провідники необхідно вибирати можливо короткими, а їх переріз – по можливості більшим.

Якщо для провідника з незмінною площею перерізу змінювати відношення ширини a до товщини b , то на ділянці високих швидкостей зміни струму di/dt буде спостерігатися залежність, обумовлена поверхневим ефектом, який полягає у витисненні струму через провідник у його при поверхневу частину. Більш важливим є не стільки збільшення опору провідника, а суттєве (десятикратне) зниження напруги перешкоди, обумовлене зменшенням його індуктивності.

Активний опір завдяки поверхневому ефекту на ВЧ може зрости в $10 \div 1000$ раз, але активна складова напруженості перешкоди $u_{ntr} = \Delta R \cdot i$ при відповідному виборі перерізу провідника залишається порівняно малою (мілівольти) по відношенню до індуктивної складової

$$u_{ntr} = L \Delta i / \Delta t \quad (2.3)$$

При заданому $\Delta i / \Delta t$ індуктивність лінії з провідником циліндричної форми дорівнює

$$L = l(\mu_0 / \pi) \ln(2d/D). \quad (2.4)$$

Отже, для зменшення L і, тим самим, u_{tr} необхідно скорочувати довжину проводів круглого перерізу для заданого діаметру, а також скорочувати до мінімуму відстань між ними; а для провідників прямокутного перерізу – збільшувати відношення a / b , яке може досягати десяти і більше. Тому лінія з плоскими проводами має набагато меншу індуктивність згідно виразу

$$L = l \cdot (2\mu_0 / \pi) \ln \left(1 + \frac{1}{1 + a/b} \right). \quad (2.5)$$

Для зниження гальванічного впливу у з'єднувальних проводах ланцюгів живлення і сигнальних контурах застосовують наступні рекомендації:

- з'єднання двох контурів необхідно здійснювати з найменшим повним опором і індуктивністю, що досягається використанням проводів великого перерізу, по-можливості меншої довжини, мінімальної відстані між проводами ланцюгів живлення, розташування прямого і зворотного проводів рядом, виконання системи опорного потенціалу у вигляді плоских шин.

- ефективним є також застосування з'єднань шин опорного потенціалу у вигляді багатьох паралельних кабелів, завдяки чому одночасно компенсуються як ємнісний, так і індуктивний вплив;

- гальванічна розв'язка повинна здійснюватись відмовою від загальних зворотних провідників в ланцюгах передачі сигналів, від використання проводів заземлення, використання корпусів приладів та машин в якості проводів сигнальних ланцюгів; необхідно роздільно живити потужні електричні і аналогові, дискретні функціональні елементи з метою усунення впливу внутрішнього опору живлячої мережі;

- застосовувати розділення потенціалів, тобто усунення будь-яких гальванічних контактів між контурами;

- вибір швидкості зміни струму $\Delta i / \Delta t$ повинен бути не більший, ніж необхідний за умовами функціонування.

Гальванічний вплив по контурам заземлення. Маємо два рознесені в просторі прилади, $G1$ і $G2$, які за вимогами техніки безпеки повинні бути заземлені (рис. 2.3).

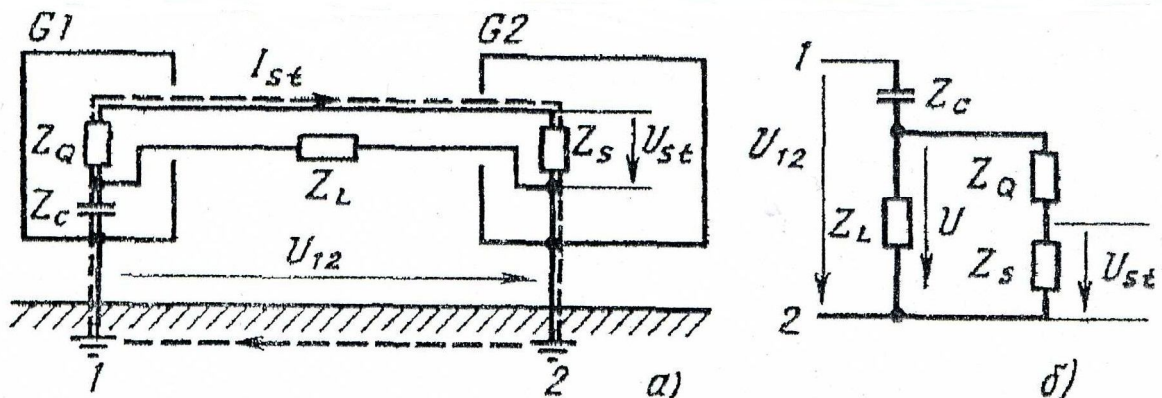


Рисунок 2.3 – Гальванічний вплив через замкнену петлю заземлення:

а) – схема пристрою; б) – схема формування напруги завади:

Z_L – повний опір лінії; Z_3 – внутрішній опір входу приладу $G2$;

Z_Q – внутрішній опір входу приладу $G1$; U_{st} – напруга перешкоди;

I_{st} – струм перешкоди; U_{12} – різниця потенціалів

Контур корисного сигналу також заземлений у двох місцях приладу. Між точками 1 і 2 може виникнути різниця потенціалів, обумовлена струмом в контурі заземлення. Ця різниця потенціалів U_{12} створює струм

перешкоди I_{zt} , внаслідок чого на внутрішньому опорі входу приладу Z_3 виникає напруга перешкоди U_{zt} , що накладена на вхідний сигнал. При синусоїдальній формі напруги мережі напруга перешкоди розраховується за припущенням, що повний опір лінії Z_L набагато менший, ніж опір Z_3

$$U_{zt} = U_{12} \frac{Z_3}{Z_3 + Z_Q}. \quad (2.6)$$

Якщо $Z_3 \gg Z_Q$, то $U_{zt} \approx U_{12}$, а при $Z_3 = Z_Q$, то $U_{zt} = 0,5 U_{12}$.

Для зменшення впливу по ланцюгам заземлення необхідно знижувати різницю потенціалів U_{12} за рахунок зменшення опору між точками 1 і 2. Цього можна досягнути зробивши підлогу провідною, або з'єднуючі прилади масивними провідниками, або ж екрануванням сигнальних ліній з заземленням екранів з обох кінців, а також зменшенням струму I_{zt} . Останнє можливе розділенням контурів заземлення приладу $G1$ (рис. 2.3). Але в цьому випадку між сигнальним контуром і корпусом приладу залишається ємнісний зв'язок Z_c , внаслідок чого виникає напруга перешкоди

$$U_{zt} \approx U_{12} \frac{Z_3}{Z_3 + Z_Q} \frac{Z_L}{Z_L + Z_c}. \quad (2.7)$$

Оскільки при $f \rightarrow \infty$, $Z_c \rightarrow 0$ і тоді $U_{zt} = U_{12} \cdot Z_3 / (Z_3 + Z_Q)$, а при $f = 0$, $Z_c = \infty$ і $U_{zt} = 0$, – тобто при високих частотах напруга перешкоди завелика, тому захист ефективний лише при постійній напрузі або низьких частотах. При високих частотах петля заземлення практично замкнена, тому ситуація відповідає рисунку 2.3 (див. дод. А).

2.2 Ємнісний механізм впливу

Ємнісний вплив може бути пов'язаний з паразитними ємностями між проводами або предметами які є провідними, що належать до різних струмових контурів. Розглянемо наступні випадки:

- контур впливу і підлягаючий впливу контури гальванічно розділені;
- контури мають загальний провід системи опорного потенціалу;
- проводи струмового контуру мають велику ємність відносно землі.

Гальванічно розділені контури. На рисунку 2.4 наведена спрощена модель ємнісного впливу при умові, що довжина контуру l мала порівняно з довжиною хвилі найбільш високої частоти.

Система провідників 1, 2 належить до контуру впливу, а провідники 3, 4 утворюють контур, що відчуває цей вплив.

Елементи контуру впливу R_Q , R_3 і C_{12} утворюють повний опір Z_1 , а елементи R_Q , R_3 і C_{34} – повний опір Z_2 контуру, який підлягає ємнісному впливу. Отже, напруга перешкоди U_{3t} дорівнює нулю, якщо виконується умова симетрії:

$$C_{12}/C_{23} = C_{14}/C_{24} \quad (2.8)$$

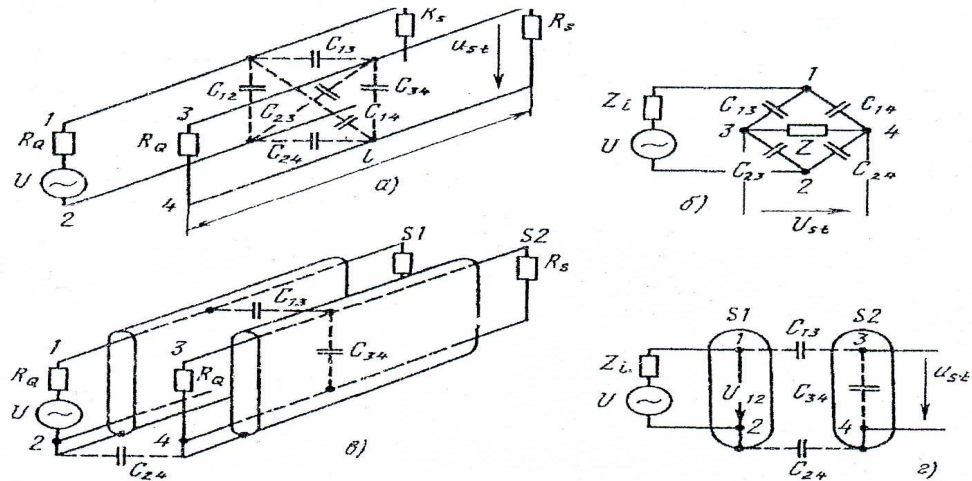


Рисунок 2.4 – Ємнісний вплив між гальванічно розділеними контурами:
а) – схема впливу; б) – схема заміщення; в) – схема впливу при екрануванні обох контурів; г) – схема заміщення при наявності екранів

Ця умова може бути реалізована попарним скручуванням проводів (проводу 1 з проводом 2, проводу 3 з проводом 4) а, в деяких випадках, – ввімкненням симетруючих конденсаторів.

Іншою можливістю зменшення ємнісного впливу є застосування екранованих проводів (рис. 2.4, в) з екранами S_1 і S_2 з добре провідного матеріалу, які зазвичай з'єднуються з одного боку з проводом системи опорного потенціалу. Завдяки цьому збільшується ємність зв'язку C_{13} . В навантаженому стані для контуру, який підлягає впливу запишемо:

$$U_{3t} / U_{12} = 1 / (1 + C_{34} / C_{13} + C_{34} / C_{24}), \quad (2.9)$$

звідки витікає, що екрануюча дія тим краща, чим більша ємність C_{34} провідника відносно екрана порівняно з ємностями C_{13} і C_{24} .

Контури із загальним проводом опорного потенціалу. Ці контури є типовими для аналогових і цифрових схем. На рисунку 2.5 наведена логічна схема, в якій можлива самовільна зміна стану перемикаючого елемента при зміні сигналу на виході елемента A внаслідок паразитної ємності C_{13} .

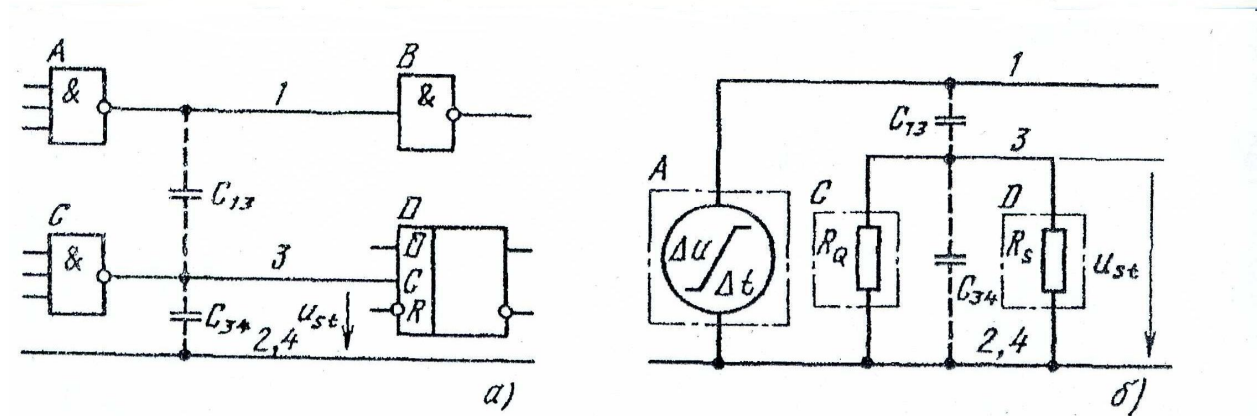


Рисунок 2.5 – Ємнісний вплив контурів із загальним проводом системи опорного потенціалу 2, 4:

а) – схема з елементами логіки; б) – схема заміщення; 1, 2 – контур впливу; 3, 4 – контур, що відчуває вплив; C_{13} – паразитна ємність зв'язку

При умові $R_3 \gg R_Q$, отримаємо напругу перешкоди в операторній формі

$$u_{zt}(p) = \left[\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) \frac{1}{p^2} \right] \frac{p C_{13} R_Q}{1 + p R_Q (C_{13} + C_{34})}. \quad (2.10)$$

Рішення цього рівняння має вигляд

$$u_{zt} = R_Q C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) (1 - e^{-t / R_Q (C_{13} + C_{34})}) \quad (2.11)$$

Якщо постійна часу $R_Q \cdot (C_{13} + C_{34}) \ll \Delta t$, то максимальна напруга перешкоди

$$u_{zt\max} = R_Q \cdot C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right). \quad (2.12)$$

Ємність зв'язку C_{13} визначається геометричними розмірами і топологією провідників, і при діаметрі D і довжини l , які розташовані паралельно на відстані d (рис.2.6) мають ємність зв'язку:

$$C_{13} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left[d / D + \sqrt{(d / D)^2 - 1} \right]} \quad (2.13)$$

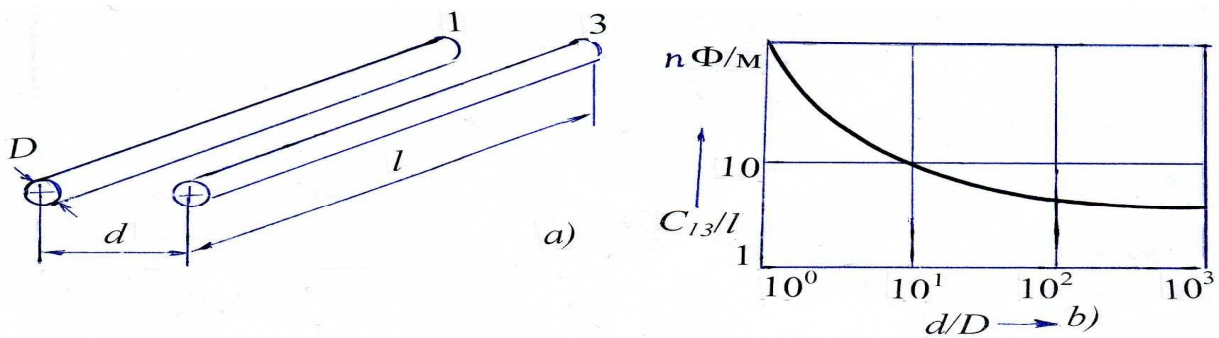


Рисунок 2.6 – Паралельно прокладені провідники – (а), і залежність погонної індуктивності C_{13}/l від відношення d/D – (б)

Реальні величини ємності при цьому складають зазвичай від 5 до 100 пФ/м.

Для зменшення ємнісного впливу контурів з загальним проводом системи опорного потенціалу розроблені наступні рекомендації:

- забезпечення малого зв'язку C_{13} досягається зменшенням довжини проводів, зменшенням діаметра проводу D , збільшенням відстані d між проводами 1 і 2, виключенням їх паралельній прокладки, застосуванням ізоляції проводів і печатних плат з малою діелектричною проникністю;

- збільшенням ємності C_{34} шляхом розміщення сигнальних проводів між провідниками системи опорного потенціалу, використання вільних жил кабелю в якості проводів системи опорного потенціалу;

- виконанням максимально низькоомними струмових контурів впливу;

- обмеженням швидкості зміни напруги $\Delta u/\Delta t$;

- екрануванням проводів і контурів, які чутливі до впливу перешкод (під впливом екрану зменшується ємність C_{13} , а ємність C_{34} збільшується, що призводить згідно (2.11) і (2.12) при незмінній швидкості зміни напруги $\Delta u/\Delta t$ до зниження напруги перешкоди).

2.3 Взаємний індуктивний вплив контурів

Індуктивний вплив обумовлений паразитним зв'язком між контурами промислових пристроїв і утворених при розрядах блискавки, або розрядах статичної електрики. На рисунку 2.7 показано два індуктивно зв'язаних контури, і якщо в контурі 1 відбувається швидка зміна струму $\Delta i / \Delta t$, то в контурі 2 індуктується напруга перешкоди

$$u_{zt} = L_{12} \Delta i / \Delta t = - \Delta \Phi / \Delta t, \quad (2.14)$$

де Φ – магнітний потік, що пронизує контур 2; L_{12} – взаємна індуктивність контурів 1 і 2.

Їхня взаємна індуктивність визначається конфігурацією і розмірами контурів і розраховується за формулою

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left[1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right], \quad (2.15)$$

де l і a – довжина і ширина контура; d – відстань між контурами.

Погонна взаємна індуктивність в залежності від відношення a/d може бути визначена з графіка (рис. 2.7, б)

Згідно (2.14) і (2.15) при $l = 1\text{ м}$, $a/d = 0,1$ і $\Delta i/\Delta t = 1000\text{ А/с}$, отримуємо напругу перешкоди $u_{zt} = 2,3\text{ В}$.

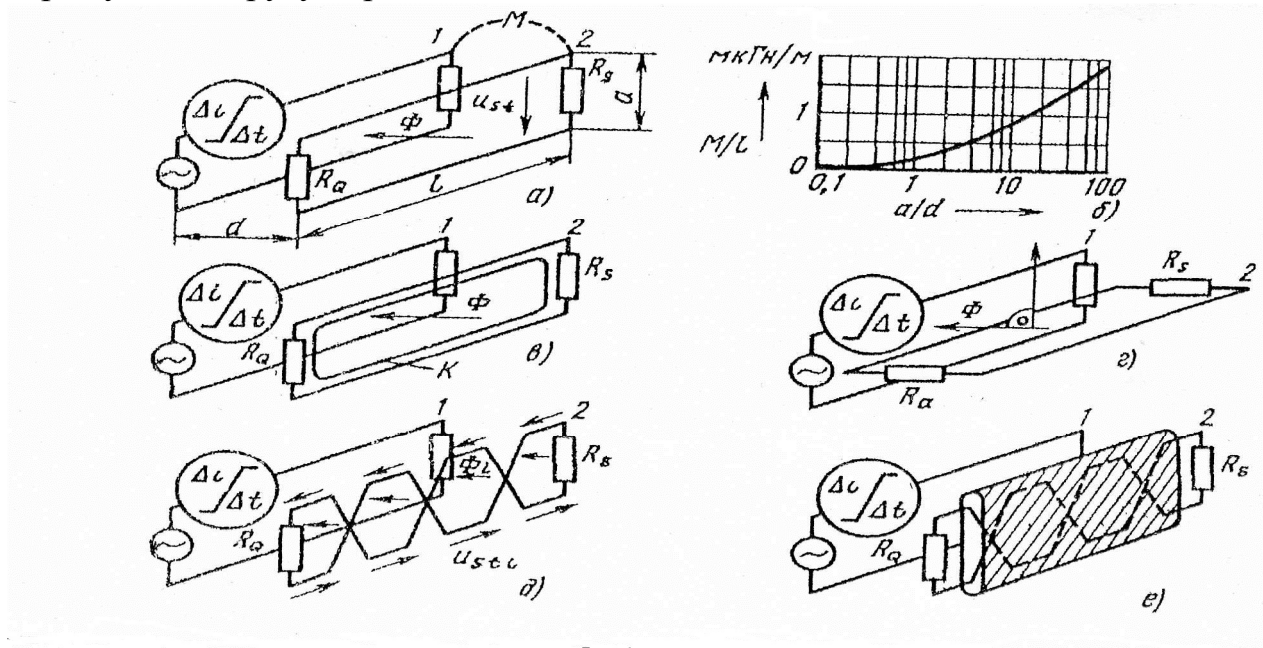


Рисунок 2.7 – Індуктивний вплив між промисловими струмовими контурами:

- а) – принципова схема двох струмових контурів 1 і 2 ;
- б) – погонна взаємна індуктивність M/l в залежності від a/d ;
- в ÷ е) – засоби по зниженню індуктивного впливу

Якщо електростатичний розряд відбувся на провідниковий корпус приладу G (рис. 2.8), то в контурі, що знаходиться усередині приладу і віддалений від провідника зі струмом розряду i_{ESD} на середню відстань r_o , то в ньому індуктується напруга

$$u_{zt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{a l}{r_o} \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (2.16)$$

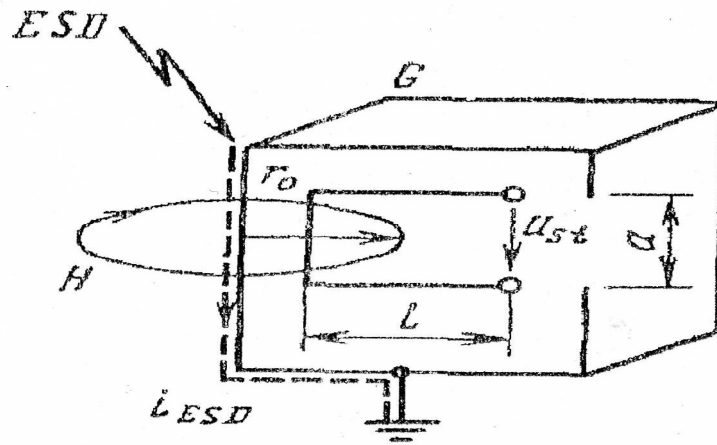


Рисунок 2.8 – Індуктивний вплив розряду статичної електрики ESD на петлю l , – a усередині приладу G : (l, a) – довжина і ширина контуру

Так, при $a = l = 1\text{ см}$, $r_0 = 5\text{ см}$ і швидкості зміни струму в часі $\Delta i / \Delta t = 10\text{ А/нс}$, то наведена напруга завади досягне величини $u_{st} = 4\text{ В}$.

Зниження взаємного індуктивного зв'язку згідно (4.5)–(4.7) можливе при наступних умовах:

- зменшення L за рахунок довжини провідників l ; збільшення відстані між мережними і інформаційними провідниками; зменшення площі контуру;
- зменшення швидкості зміни потоку $\Delta \Phi / \Delta t$ в часі за допомогою короткозамкненої петлі K , що розташована безпосередньо біля сигнального проводу (рис.4.4,в);
- компенсація індукованої в контурі напруги шляхом скрутки проводів, при яких магнітні потоки створюють напруги, спрямовані протилежно;
- екранування кабелів, з'єднувальних проводів, модулів і приладів феромагнітними екранами з великою магнітною проникністю, причому екрани заземлюються з обох боків;
- зниження дії магнітного потоку, шляхом скручування проводів контуру 1, що призводить до створення зустрічних компонентів потоку і їх дія на вторинний контур компенсується.

2.4 Механізм впливу через електромагнітні поля

Якщо існує джерело, яке випромінює електромагнітну хвилю, що розповсюджуються із швидкістю світла ($c = 300000\text{ км/с}$), то між довжиною хвилі λ і частотою випромінювання f існує зв'язок: $\lambda = c / f$.

При відстані x між джерелом і контуром, на який впливає ця хвиля, виконуються умови дальнього поля: $x > \lambda / l$, то це необхідно враховувати при частоті 1 МГц на відстані $x = 50\text{ м}$, а при частоті 1 ГГц на відстані $x = 5\text{ см}$ до джерела (рис. 4.6).

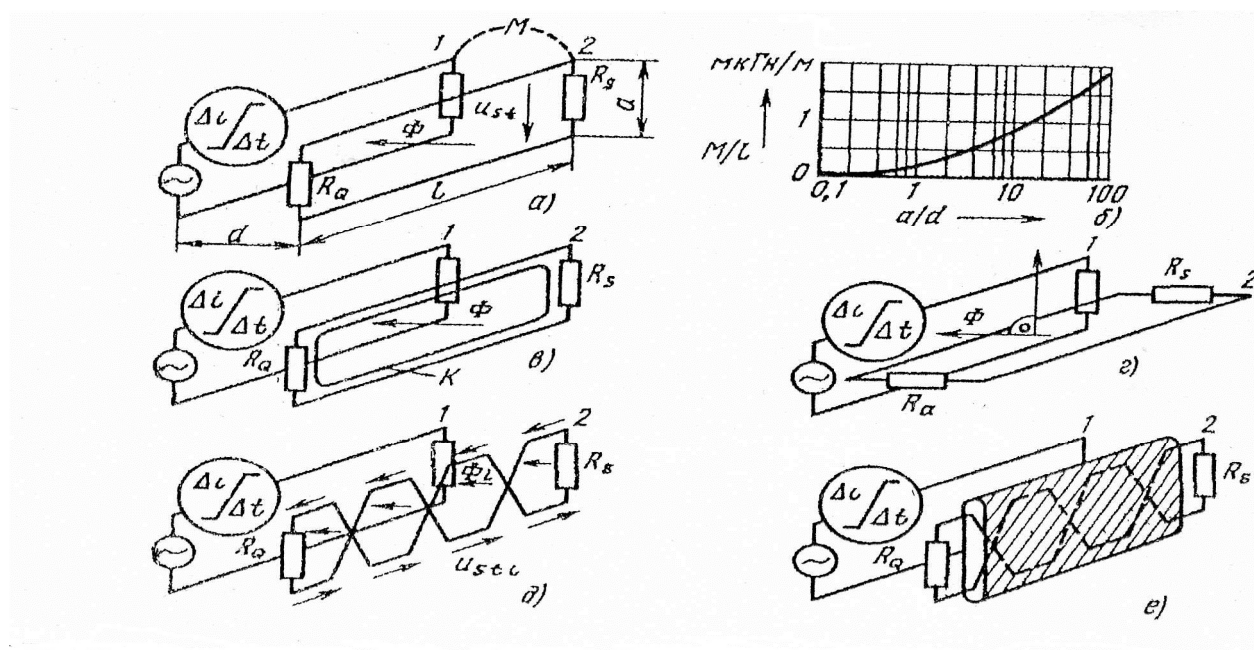
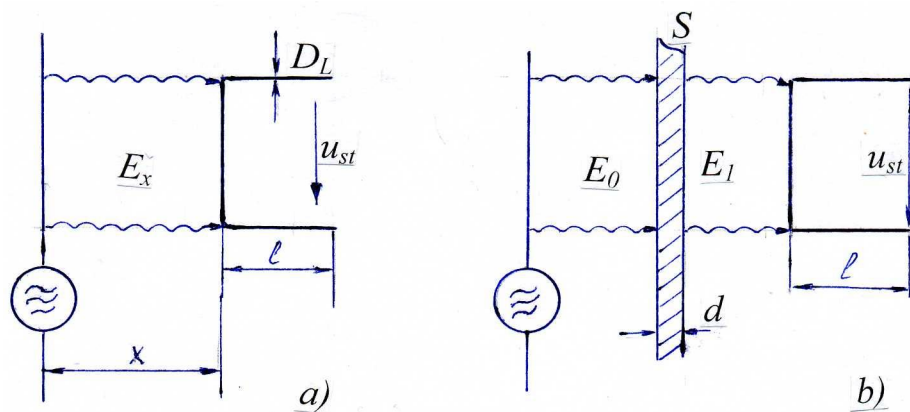


Рисунок 4.6 – Електромагнітний вплив на контур довжиною l без екрану – (а), і з екраном S товщиною d – (б)

Напруженість електричного поля на відстані x від джерела потужністю P визначається співвідношення

$$E_x = 0,3 \sqrt{P} / x. \quad (2.17)$$

Під дією електромагнітної хвилі на електропровідних об'єктах внаслідок антенного ефекту виникають ВЧ напруги, які є перешкодами в сигнальних контурах. Індуктована ЕРС в антені розраховується з виразу

$$U_{zt} = E_x \cdot l_{ef}, \quad (2.18)$$

де l_{ef} – ефективна довжина антени.

Довжина l_{ef} залежить від розмірів пристрою і довжини набігаючої хвилі. Для конкретних об'єктів вона визначається в нормах DIN/VDE 0848. Так, на частоті $f = 300$ МГц, $E_x = 10$ В/см, $l = 0,1$ м – напруга перешкоди буде сягати $U_{zt} = 2$ В.

Ефективним захистом від негативного впливу електромагнітного поля, як для послаблення випромінювання, так і для зменшення проникнення, слугують екрануючі стінки, які встановлюють між джерелом перешкод і приймачем (рис. 4.6, б). При цьому напруженість падаючого поля зменшується завдяки як поглинанню енергії поля в матеріалі екрану, так і відбиттю хвилі яка набігає. Ступень затухання поля залежить від товщини екрану, його електропровідності і магнітної проникності матеріалу, а також частоти джерела випромінювання.

3 МАТИМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1 Опис періодичних процесів у часовій та частотній формах

Для кількісної оцінки рівня електромагнітних полів застосовують логарифмічні масштаби, які дозволяють наглядно показати співвідношення величин, що відрізняються на декілька порядків. Існує два види логарифмічних співвідношень – це рівень і ступень передачі.

Рівень визначає відношення виміряної величини до її базового значення.

Ступень передачі визначає відношення вхідних і вихідних величин системи та є характеристикою її трансляційних (передаточних) властивостей. За допомогою десятичного логарифму визначають рівні перешкод, які вимірюються в децибелах:

Напруга: $u_{dB} = 20 \lg (u_x / u_o)$, де $u_o = 1 \text{ мкВ}$;

Струм: $i_{dB} = 20 \lg (i_x / i_o)$, де $i_o = 1 \text{ мкА}$;

Напруженість електричного поля: $E_{dB} = 20 \lg (E_x / E_o)$, де $E_o = 1 \text{ мкВ/м}$;

Напруженість магнітного поля: $H_{dB} = 20 \lg (H_x / H_o)$, де $H_o = 1 \text{ мкА/м}$;

Потужність: $P_{dB} = 20 \lg (P_x / P_o)$, де $P_o = 1 \text{ мкА/м}$.

В даних співвідношеннях введений множник 20, який забезпечує простий вираз потужності у відносних логарифмічних одиницях.

Знайдемо вираз P_{dB} через u_{dB} і i_{dB} : $u_{dB} = 20 \lg (u_x / u_o)$, звідки

$$u_x = u_o \cdot 10^{u_{dB} / 20}.$$

Аналогічно: $i_x = i_o \cdot 10^{i_{dB} / 20}.$

Окрім десятинних використовують також натуральні логарифми – при цьому рівень перешкод вимірюється в неперах.

Напруга: $u_{\text{Нп}} = \ln(u_x/u_o)$, де $u_o = 1 \text{ мкВ}$;

Струм: $i_{\text{Нп}} = \ln(i_x/i_o)$, де $i_o = 1 \text{ мкА}$;

Напруженість електричного поля: $E_{\text{Нп}} = \ln(E_x/E_o)$, де $E_o = 1 \text{ мкВ/м}$;

Напруженість магнітного поля: $H_{\text{Нп}} = \ln(H_x/H_o)$, де $H_o = 1 \text{ мкА/м}$;

Потужність: $P_{\text{Нп}} = 0,5 \ln(P_x/P_o)$, де $P_o = 1 \text{ пВт}$.

Між децибелом і непером існує співвідношення: $1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}$.

Значення дБ, які часто використовують, та відповідні їх відношення, що стоять під знаком логарифму:

$$10:1 = 20 \text{ дБ}; \quad 100:1 = 40 \text{ дБ}; \quad 1000:1 = 60 \text{ дБ}; \quad 10000:1 = 80 \text{ дБ}.$$

Таким чином, рівень перешкод збільшується на одну і ту величину з кожним наступним порядком.

Перешкоди можуть бути описані як в часовому, так в частотному вимірах. Для періодичних перешкод основними параметрами є частота (f) і амплітуда (X). Ці параметри визначають амплітуду напруги перешкоди у вторинних контурах (U_{max}) (рис. 3.2).

Для неперіодичних перешкод основними параметрами є :

– швидкість зміни ($\Delta x/\Delta t$) (швидкість наростання або спаду), що визначає максимальну напругу перешкоди (U_{smax}) у вторинному ланцюгу;

– інтервал часу (Δt), на протязі якого перешкода X має максимальну швидкість зміни амплітуди (цей інтервал відповідає тривалості дії наруги перешкоди U_s у вторинному ланцюгу).

– максимальне значення зміни амплітуди (Δx), пропорційне інтегралу напруги перешкоди у вторинному ланцюгу в часі (площа імпульсу перешкоди).

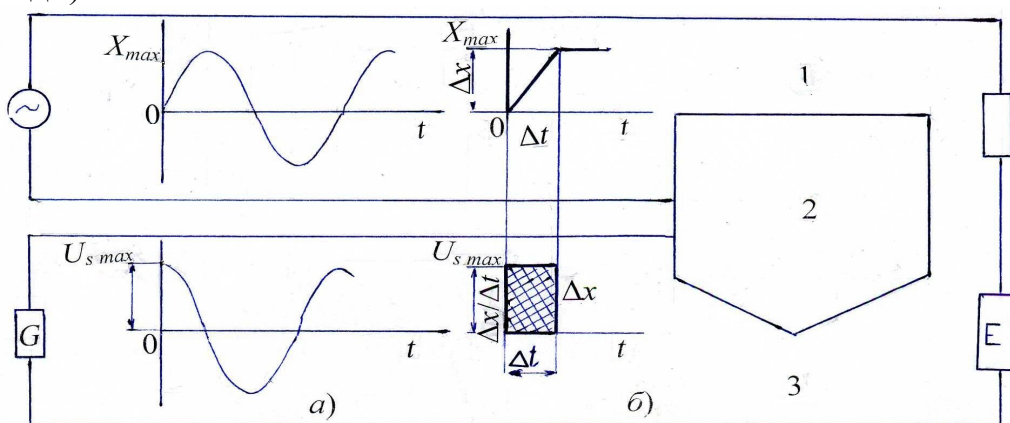


Рисунок 3.1 – Параметри періодичних (а) і неперіодичних перехідних (б) перешкод:

E – приймач сигналів; G – джерело сигналів; x – перешкода; u_s – напруга перешкоди; 1 – впливаючий контур; 2 – гальванічний, ємнісний або індуктивний зв'язок; 3 – контур, на який йде вплив

При періодичних перешкодах використовують поняття амплітудний спектр, а при імпульсних – спектр амплітудної щільності. Ці представлення забезпечують:

- оцінку впливу перешкоди на систему;
- розрахунок впливу, обумовлений заданим зв'язком;
- вибір параметрів засобів придушення перешкод (наприклад, фільтрів);
- визначення граничних меж (максимально можливого або допустимого випромінювання перешкод або границь їх стійкості);
- отримання уяви про вплив перешкод при випробуваннях згідно норм ЕМС.

Передаточні властивості шляхів зв'язку та засобів придушення перешкод зручно представляти в частотному вигляді, тоді таке представлення використовують і для опису перешкод. Перерахунок періодичних процесів із часової форми в частотну здійснюють за допомогою ряду Фур'є, а перерахунок однократних імпульсних процесів – за допомогою інтеграла Фур'є.

Сінусоїдальні та косінусоїдальні перешкоди. Гармонічні процеси можуть бути представлені як в часовому, так і частотному вигляді (рис. 3.2). В частотному вигляді перешкода характеризується кутовою частотою ω і частотою коливаль $f = \omega / 2\pi$.

Несінусоїдальні періодичні функції (пилкоподібні, або прямокутної форми імпульси струму або напруги) можуть бути представлені в частотному вигляді – як нескінченна сума сінусоїдальних і косінусоїдальних коливаль – тобто рядом Фур'є.

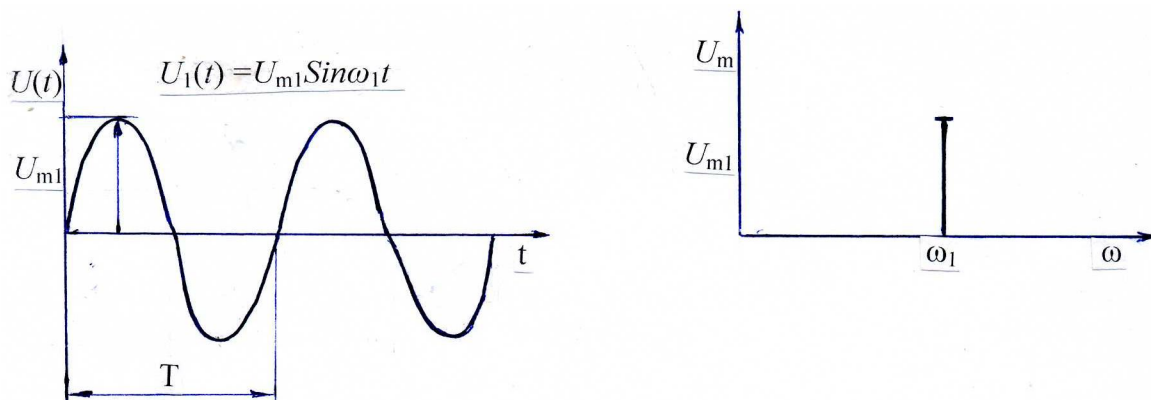


Рисунок 3.2 – Представлення сінусоїдальної перешкоди у часовій та частотній формі

Несиметричну напругу прямокутної форми можна представити у вигляді накладання основного коливаль u основної частоти $f = 1/T$ і нескінченної кількості гармонічних коливаль u_n з частотами nf_1 .

Залежність амплітуд окремих коливань від частоти являє собою дискретний лінійчастий спектр (рис. 3.3).

Найменша з частот спектра – це основна частота, а інші частоти – кратні основній частоті (напр. $f_3 = 3f_1$).

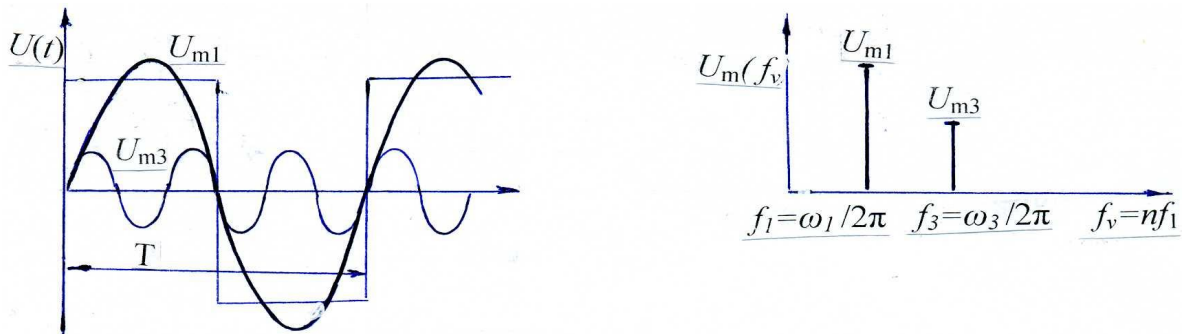


Рисунок 3.3 – Представлення періодичної несинусоїдальної функції

Аналітично ряд Фур'є функції часу може бути записаний в різних формах:

Нормальна:
$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U'_n \cos n\omega t + U''_n \sin n\omega t), \quad (3.1)$$

де $U'_n = 2/T \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt$, $U''_n = 2/T \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt$, $U_0 = 1/T \int_0^T u(t) dt$.; (3.2)

U'_n , U''_n – амплітуди окремих коливань, а U_0 – відповідає середньому арифметичному функції часу (стала складова).

Амплітудно-фазова: Оскільки синусоїдальні коливання можна представити і як косинусні ($\sin(90^\circ \pm \alpha) = \cos \alpha$), то замість нормальної форми застосовують і амплітудно-фазову:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n), \quad (3.3)$$

де $U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}$; $\varphi_n = -\arctan(U_n''/U_n')$.

Комплексна:

Доповнюючи ці рівняння уявною частиною і замінюючи тригонометричні функції за формулою Ейлера: $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ експоненційними функціями, отримаємо рівняння в комплексній формі:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{+n} + \dot{C}_{-n} e^{-jn\omega_1 t}), \quad (3.4)$$

де $\dot{C}_n (\pm n\omega_1) = 1/T \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |\dot{C}_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n}$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Оскільки функція $u(t)$ будучи представлена комплексним рядом Фур'є (3.4), залишається дійсною, то у правій частини вводять від'ємні частоти, що призводить до двохстороннього спектра (рис. 3.4), тоді:

$$|C_{+n}| = |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0. \quad (3.5)$$

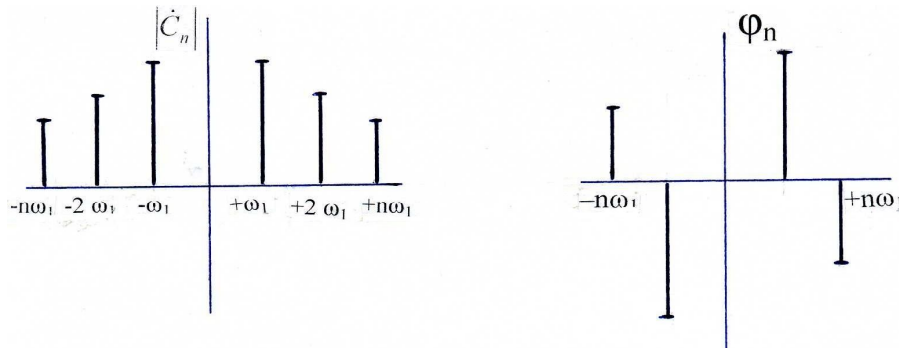


Рисунок 3.4 – Амплітудний і фазовий спектр комплексного ряду Фур'є

На практиці замість двохстороннього математичного спектра $\dot{C}_n = f(\pm n \omega_1)$, розраховують односторонній «фізичний» спектр тільки для позитивних n , амплітуди яких відрізняються на 2 від амплітуд двохстороннього спектра $2|\dot{C}_n| = f(\pm n \omega_1)$.

Амплітуди вищих гармонік з'являються з однаковим інтервалом: $\Delta f = f_1 = 1/T$, а їх частоти кратні основній частоті $f_1 = n f_1$.

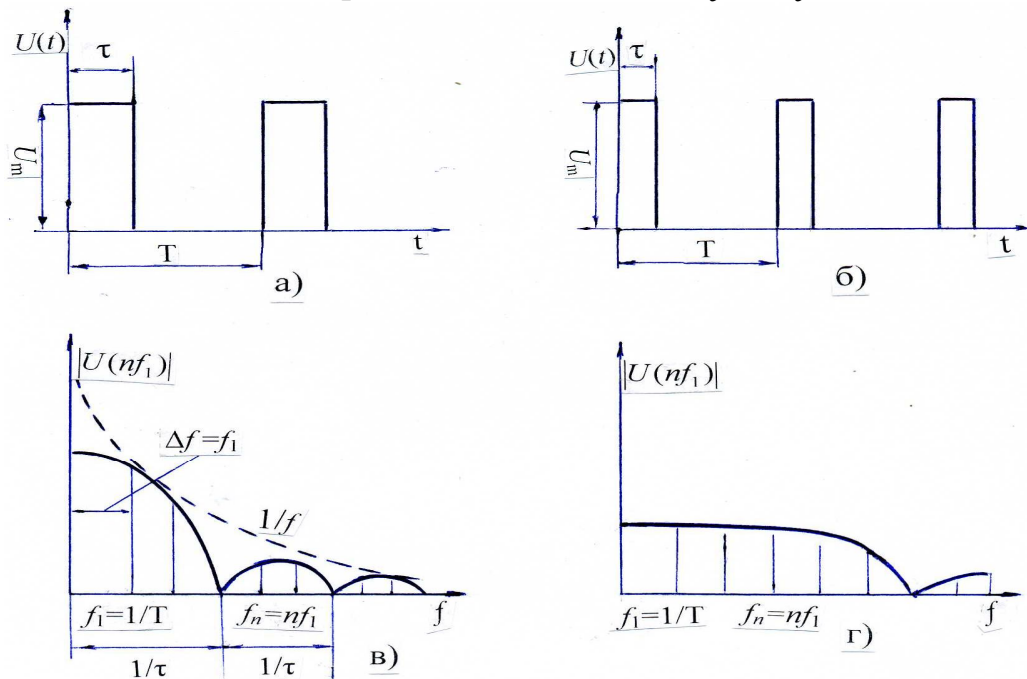


Рисунок 3.5, а, б – Лінійчаті спектри двох періодичних прямокутних імпульсів із скважністю (1: 2):

б – функція $Si(x)$, – огинаюча спектральних амплітуд (суцільна лінія); функція $1/f$ – огинаюча функції $Si(x)$ (пунктирна крива)

Ряд Фур'є для послідовності прямокутних імпульсів має вигляд:

$$U(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + (1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T}) \right) \sin n\omega_1 t \right]. \quad (3.6)$$

Коефіцієнти (спектральні амплітуди) визначаються за формулою

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{(n\pi\tau/T)} \quad (3.7)$$

Огинаюча спектральних амплітуд відповідає функції $Si(x) = \sin(x)/x$. Перше значення нуля цієї функції відповідає зворотній величині тривалості імпульсу $f_1^{Si=0} = 1/\tau$.

Постійний коефіцієнт при функції $Si(x)$, який дорівнює $2U_m\tau/T$ при незмінному періоді пропорційний площі імпульсу $U_m\tau$.

Отже, високі вузькі імпульси при низьких частотах можуть мати такий же спектр, як низькі і широкі.

Огинаюча амплітуд функції $Si(x)$ – є функція $1/x$. Для прямокутних імпульсів з ∞ тривалістю періоду T спектральні лінії і максимуми функції $Si(x)$ зближуються, отримуючі спектр $1/f$ ступінчастої функції.

3.2 Представлення неперіодичних функцій часу у частотній формі

До неперіодичних процесів відносять комутаційні явища: блискавка або розряд статичної електрики. Для визначення спектру неперіодичної імпульсної функції зробимо граничний перехід за допомогою комплексної форми запису ряду Фур'є для періодичних функцій в межах інтегрування: $-T/2$ і $+T/2$:

$$u(t)_{\text{пер}} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \quad (3.8)$$

Оскільки в лінійчастому спектрі ряду Фур'є відстань між спектральними лініями $\Delta f = \Delta\omega/2\pi = f_1 = 1/T$, то можемо записати

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta\omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \quad (3.9)$$

Далі виконуємо граничний перехід при $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow 0$, при якому відстань між спектральними лініями $\Delta\omega$ за знаком суми стає нескінченно малою $d\omega$, а дискретна змінна $n\Delta\omega$ переходить в безперервну змінну ω , а сума – в інтеграл. Отже, отримуємо інтеграл Фур'є для неперіодичної функції.

$$u(t)_{\text{непер}} = \lim u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.10)$$

Вираз під інтегралом $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt$ є перетворенням Фур'є функції $u(t)$, яке називають *спектральною щільністю* $u(t)$.

Для неперіодичній функції $u(t)$ зворотнє перетворення Фур'є має вигляд

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.11)$$

Таким чином, перетворення Фур'є та його обернення – взаємо-зворотні з точністю до множника $1/2\pi$.

Оскільки спектральна функція $\dot{X}(\omega)$ ідентична лінійчатому спектру \dot{C}_n , віднесеному до відстані між сусідніми частотами: $T = 1/\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, – тому вона отримала назву *спектральної щільності*

$$\dot{C}_n = \Delta f \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3.12)$$

Спектральну щільність отримаємо, якщо віднести амплітуди \dot{C}_n до Δf і утворити граничне значення для $T \rightarrow \infty$ (відповідно $\Delta f \rightarrow 0$), отримаємо

$$\lim_{\Delta\omega} \frac{\dot{C}_n}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = \dot{X}(\omega), \quad (3.14)$$

– тобто спектральну щільність.

Якщо лінійчастий спектр \dot{C}_n вимірюється у вольтах, то спектральна щільність $\dot{X}(\omega)$ порівняного однократного процесу вимірюється в В/Гц.

Неперіодичні процеси також можуть бути представлені як накладання синусоїдальних або косинусоїдальних коливань, але в цьому випадку тут присутні усі частоти від $-\infty$ до $+\infty$.

Відношення енергії імпульсу до частоти дає спектральну щільність, граничне значення якої при $\Delta f \rightarrow \infty$ відповідає перетворенню Фур'є.

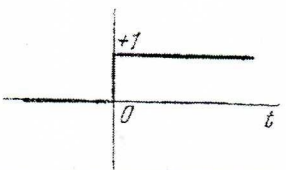
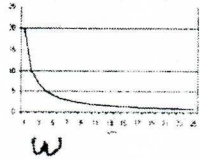
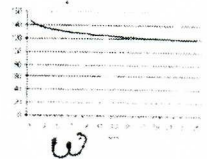
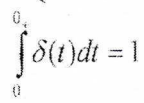
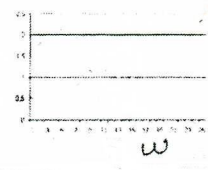

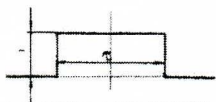
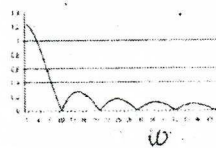
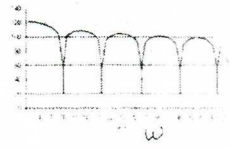

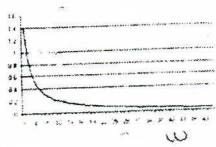

Таблиця 3.1 – Діапазони значень параметрів електромагнітних перешкод

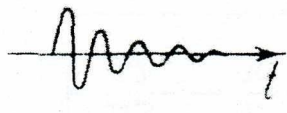
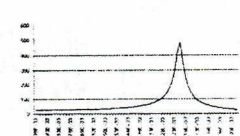
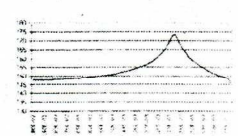
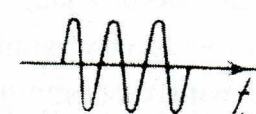
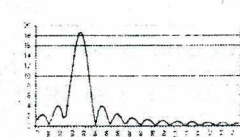
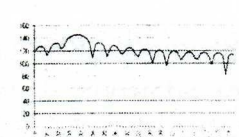
Параметр	Позначення	Величина
Частота, Гц	f	$0-10^{10}$
Максимальна напруга, В	U_{max}	$10^{-6}-10^6$
Швидкість зміни напруги, В/с	du/dt	$0-10^{12}$
Напруженість електричного поля, В/м	E	$0-10^5$
Максимальна величина струму, А	I_{max}	$10^{-9}-10^5$
Швидкість зміни струму, А/с	di/dt	$0-10^{11}$
Напруженість магнітного поля, А/м	H	$10^{-6}-10^8$
Час наростання імпульсу, с	T_r	$10^{-9}-10^{-2}$
Тривалість імпульсу, с	τ	$10^{-8}-10$
Енергія імпульсу, Дж	W	$10^{-9}-10^7$

3.3 Спектри періодичних і імпульсних процесів

В таблиці 3.2 приведені «фізичні» спектральні щільності $2|\dot{X}(\omega)|$ деяких імпульсних процесів та графіки «фізичних» спектральних щільностей в лінійній та логарифмічній системі координат.

Таблиця 3.2 – Спектральні щільності деяких характерних процесів

№ п.п.	Форма імпульсу $f(t)$	Спектр імпульсу $2 \dot{X}(\omega) $
1	<p>Одинична функція $\begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sigma(t) = \begin{cases} 1/2 & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \end{cases}$</p> 	<p>$\dot{X}(\omega) = 1/j\omega,$ $2 \dot{X}(\omega) = 2/\omega$ Рівень(В/Гц) Рівень(ДБ)</p>  
2	<p>Одинична імпульсна функція $\begin{cases} 0 & t < 0 \\ \delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases} \end{cases}$ $\int_0^\infty \delta(t) dt = 1$</p> 	<p>$\dot{X}(\omega) = 1$ $2 \dot{X}(\omega) = 2$ Рівень(В/Гц) Рівень(ДБ)</p>  
3	<p>Прямокутний імпульс $u(t) = h(\sigma(t + \tau/2) - \sigma(t - \tau/2))$</p>  <p>$h = 1; \quad \tau = 0,628$</p>	<p>$\dot{X}(\omega) = 2h \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 4h \left \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega} \right$ Рівень(В/Гц) Рівень(ДБ)</p>  
4	<p>Експоненційний імпульс $u(t) = e^{\beta t} \sigma(t)$ $\beta = -1$</p> 	<p>$\dot{X}(\omega) = 1/(\beta + j\omega)$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \sqrt{\frac{1}{\beta^2 + \omega^2}}$ Рівень(В/Гц) Рівень(ДБ)</p>  

5	<p>Затухаюча синусоїда $u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t) \sigma(t)$ $\alpha = 0,04; \quad \omega_1 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \omega_1 / (\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2 + 2j\alpha\omega)$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\omega_1 \sqrt{\frac{1}{(\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <p>Рівень(В/Гц)</p>  </div> <div> <p>Рівень(ДБ)</p>  </div> </div>
6	<p>Імпульс в формі відрізка синусоїди $u(t) = (\sigma(t+nT/2) - \sigma(t-nT/2)) \sin \omega_0 t$ $n = 3; \quad \omega_0 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = (1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \left (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0} \right $ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <p>Рівень(В/Гц)</p>  </div> <div> <p>Рівень(ДБ)</p>  </div> </div>

Всі елементи технічних пристроїв розділяють на дві основні групи: лінійні інерційні (динамічні), та нелінійні неінерційні. Будь-який елемент електротехнічного пристрою можна розглядати як нелінійний інерційний.

Лінійна інерційна система характеризується тим, що величина $y(t)$ отримується суперпозицією (складанням) усіх значень $x(t)$, кожне з яких помножується на ваговий коефіцієнт $h(t, \tau)$, який залежить, як від моменту прикладання процесу до входу системи, так і від моменту спостереження t процесу на виході системи. Якщо в процесі спостереження параметри системи залишаються незмінними, то значення вагового коефіцієнта $h(t, \tau)$ залежить лише від різниці $t - \tau$. Отже, значення процесу на виході системи $y(t)$ залежить від процесу на вході $x(t)$ таким чином

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) x(\tau) d\tau. \quad (3.15)$$

Функція $h(t, \tau)$ – це імпульсна перехідна функція, яка є реакцією системи на її виході при дії на вході одиничної імпульсної функції $\delta(t)$.

При аналізі лінійної інерційної системи в частотному діапазоні використовують передаточну функцію $\dot{k}(\omega)$, яка представляє собою перетворення Фур'є від $h(t, \tau)$

$$\dot{k}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-j\omega u} du, \quad (3.16)$$

де $u = t - \tau$.

Імпульсна перехідна функція лінійної системи з постійними параметрами зв'язана з передаточною функцією зворотним перетворенням Фур'є

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{k}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.17)$$

Модуль і аргумент передаточної функції $\dot{k}(j\omega)$ називають частотною $|C(\omega)|$ і фазовою $\varphi(\omega)$ характеристиками лінійної системи

$$\dot{k}(\omega) = C(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.18)$$

Ширина полоси пропускання частотної характеристики визначається як ширина основи прямокутника, висота якого дорівнює максимальний ординаті $C^2(\omega_0)$, а площа – площі під кривій квадрату частотній характеристики

$$\Delta_c = \frac{\int_0^{\infty} C^2(\omega) d\omega}{C^2(\omega_0)} \quad (3.19)$$

Якщо частотна характеристика має різко виражену ділянку резонансу близько до частоти ω_0 , і при цьому $\omega_0 \gg \Delta$, то лінійну систему такої характеристики називають вузькосмуговою.

Спектральна щільність процесу на виході системи при відомій спектральній щільності на вході визначиться за допомогою передаточної функції лінійної інерційної системи

$$\dot{X}_2(\omega) = \dot{k}(\omega)' \dot{X}_1(\omega) \quad (3.20)$$

Якщо перемножити спектральну щільність на вході джерела перешкод $\dot{X}_d(\omega)$ з передаточною функцією каналу передачі $\dot{k}_{\kappa n}$ і передаточною функцією приймача перешкоди \dot{k}_{np} , то отримаємо спектральну щільність перешкоди в приймачеві

$$\dot{X}_{np}(\omega) = \dot{X}_d(\omega) \dot{k}_{\kappa n}(\omega) \dot{k}_{np}(\omega). \quad (3.21)$$

Оскільки в логарифмічному масштабі множення відповідає складанню, то при складанні кривої щільності розподілу амплітуд вхідної перешкоди з амплітудно-частотною характеристикою каналу передачі (наприклад, з

кривою затухання фільтра), то отримаємо графік щільності розподілу амплітуд перешкоди після фільтра. Отже, вимірювання спектру перешкод дає змогу розрахувати відповідні параметри фільтрів, екранів та інших захисних елементів

3.4 Класифікація середовища по інтенсивності електромагнітних полів

Клас 1: низький рівень електромагнітного випромінювання (місцеві радіо- і телестудії на відстані ближче 1 км.

Клас 2: середня інтенсивність електромагнітного випромінювання. Радіотелефони повинні розташовуватись на відстані більше 1 м від чутливих пристроїв.

Клас 3: дуже сильне електромагнітне випромінювання, обумовлене приладами радіотелефонії великої потужності розташовані безпосередньо біля пристроїв.

Клас 4: дуже сильне випромінювання. Ступень контролю повинна узгоджуватись між сторонами.

Вибраний клас середовища встановлює норми контролю: – амплітуди випробувальних напруг і струмів, які, наприклад, повинні в 2 рази (або на 6 дБ) перевищувати рівень завад, характерних для відповідних класів навколишнього середовища.

При виборі засобів для забезпечення ЕМС необхідно на основі мінімального ризика визначити імовірність виникнення завад, кошторис на заходи захисту від можливих завад в даному класі середовища

4 ВПЛИВ ПОЛІВ НА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

4.1 Вплив електромагнітних полів на електричні мережі

Вплив полів на мережі проявляється у появі вищих гармонік напруги та її коливань за рахунок електричного обладнання з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Трансформатори і електродвигуни з великим індуктивним навантаженням, вентильні перетворювачі струму, розрядні лампи, телеприймачі при синусоїдальному живленні мережі продукують несинусоїдальні струми, які на шляху до електрообладнання утворюють на повних опорах мережі несинусоїдальні падіння напруги. Падіння напруги, створювані струмами споживачів, призводять до викривлення синусоїдальної форми напруги мережі 50 Гц та до появи в ній гармонік.

Субгармоніки, спричинені дуговими печами і електрозварювальними апаратами, призводять до періодичних і неперіодичних коливань напруги.

Вищі гармоніки та коливання напруги можуть призвести до пошкодження технічних пристроїв, електричним і термічним перевантаженням конденсаторів і електродвигунів, відмов у функціонуванні

систем контролю, вимірювання, регулювання ліній передачі даних і т. п. Це впливає також на психофізіологічний стан персоналу.

До впливу мережі відносять також її асиметрію, обумовлену ввімкненими між фазами однофазними споживачами (зварювальними апаратами, або дуговими електропечами).

Вплив ліній електропередач. Якщо повітряні ЛЕП ВН з частою 50 Гц і 16,66 Гц і лінії зв'язку телеуправління газовими мережами і нафтопроводами розташовані паралельно на протяжних ділянках, то внаслідок омичного, індуктивного або ємнісного зв'язку виникає шкідливий вплив на лінії передачі даних, а також на пристрої катодного захисту від корозії трубопроводів. Вплив мережі може бути довготривалим, короткотривалим чи імпульсним.

Довготривалий – це робочі струми при нормальній роботі лінії, струми заземлення в мережах з компенсованою нейтраллю, а також проводах ВН, що мають велику ємність відносно землі.

Джерелом короткотривалого впливу є струми КЗ і струми замикання двох фаз на землю тривалістю декілька десятих секунди.

Імпульсний вплив виникає при перенапругах і перемиканнях.

Проблеми впливу ліній електропередач вирішуються шляхом симетричного розташування проводів трифазної системи у вигляді рівностороннього трикутника, скручуванням несиметрично розташованих проводів, резонансним заземленням нейтралі (малі струми замикання фаз на землю) а також заземленням нейтралі мереж 220 і 380 кВ.

4.2 Вплив електромагнітних полів на лінії зв'язку.

Лінії електропередач впливають на лінії провідного зв'язку завдяки різним механізмам взаємодії і можуть досягати величин, небезпечних для обслуговуючого персоналу і перевищувати електричну міцність кабелю зв'язку та входних пристроїв апаратури управління роботою електрообладнання.

Вплив полів за рахунок ємнісного зв'язку обумовлений наявністю навколо провідної повітряної лінії електричного поля. Проводи ліній зв'язку (ЛЗ), які розташовані в зоні дії поля, підлягають впливу потенціалу цього поля.

Вплив за рахунок індуктивного зв'язку обумовлений проходженням частини або всього змінного струму ПЛ по ланцюгу провід-земля. Це можливе при несиметричному навантаженні трьохфазних ПЛ, при роботі лінії по системі два проводи-земля, при однофазних або двофазних замиканнях ПЛ на землю. Магнітному впливу підлягають всі лінії провідного зв'язку, – як повітряні, так і кабельні.

Електричному впливу підлягають проводи повітряних ЛЗ, а також кабельні лінії зв'язку, підвішені на опорах, які не мають металевих оболонок.

Вплив через гальванічний зв'язок обумовлено протіканням в землі силових струмів. Гальванічному впливу підлягають заземлені металеві

оболонки кабелів і ланцюги повітряних і кабельних ліній зв'язку, які використовують в якості зворотного проводу – землю.

Розрахунок поздовжніх ЕРС в проводах зв'язку при аварійному режимі ПЛ з заземленою нейтраллю здійснюють для найбільш несприятливого випадку положення точок КЗ, змінюючи місця їх розташування по довжині зближення. При розрахунку поздовжній ЕРС розглядають КЗ ПЛ із графіка в самій небезпечній точці, коли вплив поля буде найбільший. Зазвичай, це відповідає КЗ на початку і на кінці зближення.

4.3 Вплив електромагнітних полів системи релейного захисту і управління

При однофазному КЗ на землю на шинах підстанцій (ПС) ВН потенціал контуру заземлення енергооб'єкта розподілений нерівномірно і при перевищенні електричної міцності ізоляції кабелів, можливе зворотне перекриття із землі на жили кабелів. Крім того, струм однофазного КЗ, рухаючись по заземленим оболонкам і екранам кабелів, при перевищенні по термостійкості струмових навантажень, призведе до пошкодження цих кабелів.

Від точки КЗ струм повертається в нейтраль трансформатора і в енергосистему через заземлюючий пристрій і безпосередньо через землю (рис. 4.1, а).

Для визначення можливого рівня діючих на кабелі систем релейного захисту і технологічного управління напруг і струмів при однофазному КЗ, вимірюють розподіл потенціалів і струмів на заземлюючому пристрої при імітації КЗ. Вимірюють також різницю потенціалів між точкою КЗ і заземлюючим пристроєм релейного щита, після чого результати перераховують на реальні струми КЗ. Розраховують розподіл струмів і потенціалів при коротких замкненнях в різних точках на шинах високої напруги і порівнюють з результатами вимірів.

По результатам розрахунків визначають максимальні значення напруг і струмів промислової частоти, які діють на системи релейного захисту і технологічного управління при однофазних коротких замиканнях.

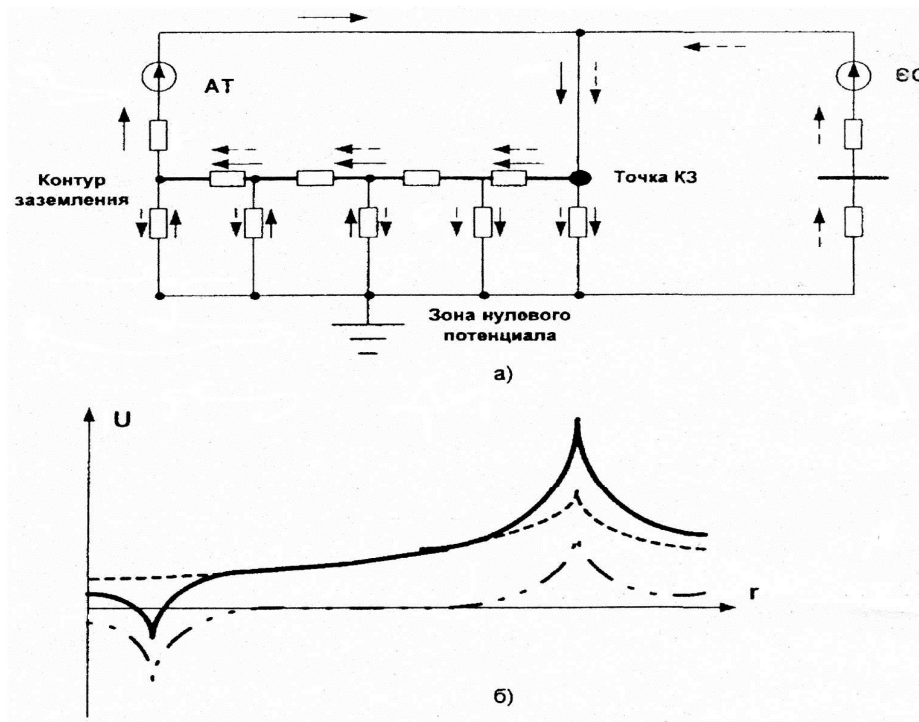


Рисунок 4.1 – Однофазне КЗ на шинах ПС ВН:

- а) – схема розтікання струму в контурі заземлення ПС;
 б) – розподіл потенціалу на заземлюючому пристрої ПС

4.4 Імпульсні поля при перехідних процесах в ланцюгах ВН

Виникнення імпульсних перешкод в ланцюгах вторинної комутації пов'язано з такими видами збуджень у первинних ланцюгах:

- КЗ на землю в ланцюгах ВН;
- комутації роз'єднувачами, короткозамикачами і вимикачами в ланцюгах ВН;
- робота розрядників.

При комутаціях і КЗ на землю, внаслідок перехідних процесів, в ланцюгах високої напруги відбувається розряд ємностей обладнання і шин на землю і через заземлювач протікає імпульсний струм високої частоти. При цьому на заземлюючому пристрої обладнання і в точці КЗ відбувається імпульсний підйом потенціалу, який з певним коефіцієнтом послаблення передається по кабелям до входу систем релейного захисту і технологічного управління.

Для визначення параметрів імпульсних перешкод проводять імітаційні випробування за допомогою генератора високочастотних імпульсів. При цьому один вивід генератора приєднують до заземлюючого провідника обладнання, до якого приєднані кабелі від систем релейного захисту і технологічного управління, а другий вивід генератора заземлюють на відстані на менш, ніж 50 м від даного обладнання. Після чого в заземлення обладнання подають імпульсний струм амплітудою до 10 А з декрементом коливання 3÷5, частотою 0,5, 1,0, 2,0 МГц. При цьому здійснюють вимірювання імпульсних перешкод на входах пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління.

Також вимірюють імпульсний потенціал заземлюючого пристрою відносно точки, віддаленої від місця вводу струму на відстані не менш 50 м в протилежному напрямку від точки заземлення генератора.

Висока частота призводить до різко нерівномірного розподілу потенціалу на заземлюючому пристрою. На відстані 50 м від точки вводу імпульсного струму потенціал знижується більш, ніж в 10 разів навіть при опорі ґрунту в 500 Ом.м.

На реальних об'єктах частота імпульсних перешкод може коливатись в діапазоні від десятків кілогерц до десятків мегагерц.

Результати вимірювань при імітації імпульсних перешкод приводяться до реального значення високочастотної складової струму КЗ. Величину реального струму визначають шляхом розрахунку перехідного процесу на шинах розподільчого пристрою при комутаціях і КЗ на землю, шляхом множення результатів виміру на коефіцієнт перерахунку

$$K_{пер} = I_{реал} / I_{вимір} , \quad (4.1)$$

де $I_{реал}$ – струм з обладнання в контур заземлення при комутаціях або однофазному КЗ на землю; $I_{вимір}$ – вимірний струм в даних точках підключення ГВЧІ.

При комутаціях первинного обладнання і при однофазному КЗ по ошиновці розподільчого пристрою протікають імпульсні струми. Електромагнітні поля від цих струмів впливають на кабелі ланцюгів вторинної комутації, внаслідок чого в них наводяться імпульсні електромагнітні перешкоди.

Найбільший рівень польових перешкод виникає при КЗ на шинах високої напруги. Визначення величини імпульсних перешкод здійснюють наступним чином:

- розрахунком визначають найбільш небезпечні види комутацій;
- на об'єкті проводять імітації комутаційних процесів за допомогою генератора ВЧ імпульсів і контрольного проводу, прокладеного по трасі розташування вторинних кабелів;
- визначають реальний коефіцієнт екранування полів між сусідніми кабелями і здійснюють вимірювання перешкод на кабелях захисту і на контрольному проводі при реальних комутаціях (рис. 4.2).

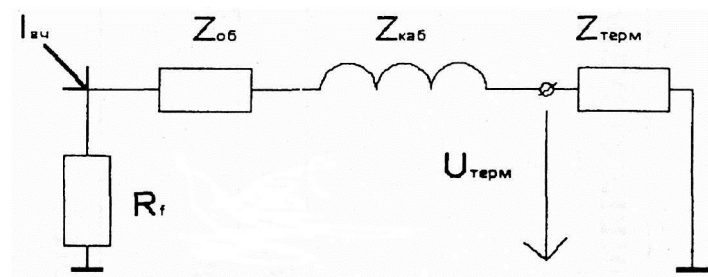


Рисунок 4.2 – Схема для розрахунку синфазної напруги при однофазному КЗ на шинах ВН енергооб'єкта:

$I_{вч}$ – високочастотна складова струму КЗ;

R_f – імпульсний опір заземлення; $Z_{об}$ – вхідний опір обладнання відносно землі; $Z_{каб}$ – опір контрольного кабелю, Z_m – вхідний опір терміналу

4.5 Імпульсні електромагнітні поля при ударах блискавки

При атмосферних розрядах можливі такі наслідки дії струму блискавки:

- термічна дія струму блискавки на заземлюючі провідники, оболонки і екрани кабелів;
- зворотні перекриття з землі на кабелі;
- польові наводки на контрольних кабелях і вплив імпульсних магнітних полів на обладнання.

Визначення рівня польових перешкод, наведених в кабелях, здійснюють шляхом розрахунків. Параметри струму блискавки згідно рекомендації МЕК 1312-1 наступні:

- максимальний імпульсний струм $I_B = 100$ кА;
- тривалість фронту імпульсу $t_{\phi p} = 10$ мс;
- при розрахунках наведених напруг на кабелях $I_B = 25$ кА, $t_{\phi p} = 0,25$ мкс.

Польові наводки можна оцінити по потужності випромінювання джерела перешкоди, використовуючи вираз для потужності випромінювання дипольних антен

$$P = \frac{(I \cdot l \cdot \omega)^2}{12\pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^3}, \quad (4.2)$$

де I – амплітуда струму, l – довжина антени, ω – кругова частота, ϵ_0 – електрична постійна, c – швидкість світла.

Для струму блискавки еквівалентну частоту можна визначити як

$$\omega = \frac{\pi}{2\tau}, \quad (4.3)$$

(де τ – час зростання струму блискавки).

При $l = 100$ м для імпульсу струму позитивної блискавки: $I_B = 100$ кА, $t_{\phi p} = 10/350$ мкс (МЕК) – маємо потужність $P = 2,8 \cdot 10^7$ Вт, а для наступного імпульсу: ($I_B = 25$ кА, $t_{\phi p} = 0,25/100$ мкс), $P = 10^{10}$ Вт.

При розрахунках польових наводок імпульс струму позитивної блискавки можна не розглядати.

Для відкритих розподільчих пристроїв визначають напруги в кабелях вторинної комутації при ударах блискавки в блискаковідводи, розташовані поблизу траси прокладки кабелів.

Для будівель і споруд визначають наругу, яка наводиться в кабелях при протіканні струму блискавки по струмовідводам блискавкоприймача будівлі.

При розрахунках рівня впливу ПЛ і ЛЗ необхідно враховувати екрануючу дію різноманітних металевих комунікацій, розташованих в зоні впливу і з'єднаних із землею. До таких комунікацій відносяться залізничні рейки, трубопроводи, оболонки силових кабелів і кабелів зв'язку, тунелі і колектори, грозозахисні троси ПЛ і т. п.

Екрануючий ефект залежить від особистого опору екрана, розташування його відносно ПЛ і ЛЗ, умов заземлення, питомого опору землі, а для екранів з магнітними матеріалам – також від поздовжньої ЕРС, яка наводиться в екрані діючим струмом.

Ємнісний вплив при ударі блискавки пов'язаний з тим, що канал блискавки набуває високого потенціалу ($U_{max} > 100\text{kV}$) завдяки падінню напруги на опорі заземлення (рис. 4.3). Внаслідок цього потенціал сигнальної лінії при наявності ємностей C_K і C_E набуває величини

$$u_{zt} = U_{max} C_K / (C_K + C_E). \quad (4.4)$$

В разі відсутності захисних апаратів від перенапруг ізоляція приладів G_1 , G_2 (рис. 4.3) може бути пошкоджена і виникне інтенсивна перешкода. Ефективний захист в даному випадку полягає у екрануванні сигнальних ліній.

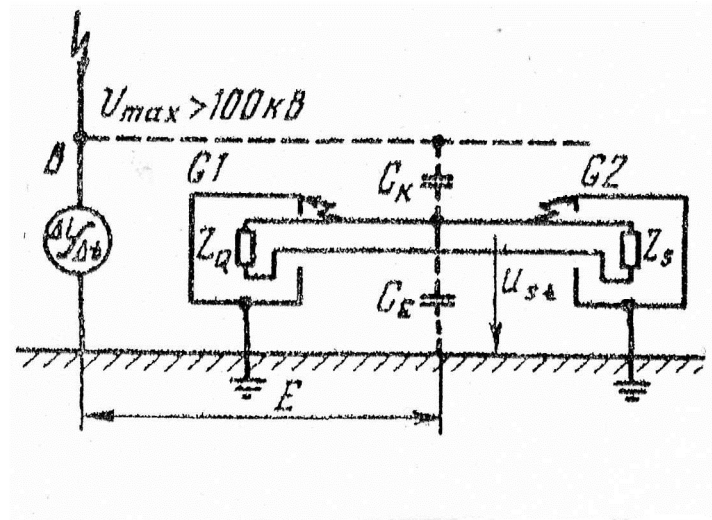


Рисунок 4.3 – Ємнісний вплив блискавки на лінію:

B – канал розряду; G_1 , G_2 – прилади; C_E – ємності зв'язку відносно землі

Індуктивний вплив блискавки обумовлений паразитними зв'язками між контурами промислових пристроїв, утворених при розрядах блискавки, або розрядах статичної електрики. На рисунку 4.4 показано два індуктивно зв'язаних контури; і якщо в контурі 1 відбувається швидка зміна струму $\Delta i / \Delta t$, то в контурі 2 індуктується напруга перешкоди

$$u_{zt} = L_{12} \Delta i / \Delta t = - \Delta \Phi / \Delta t, \quad (4.5)$$

де Φ – магнітний потік, що пронизує контур 2; L_{12} – взаємна індуктивність контурів 1 і 2.

Їхня взаємна індуктивність визначається конфігурацією і розмірами контурів і розраховується за формулою

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left[1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right], \quad (4.6)$$

де l і a – довжина і ширина контура; d – відстань між контурами.

Згідно (4.4) і (4.5) при $l = 1\text{ м}$, $a/d = 0,1$, $\Delta i/\Delta t = 1000\text{ А/с}$, отримуємо індуковану напругу перешкоди $u_{st} = 2,3\text{ В}$.

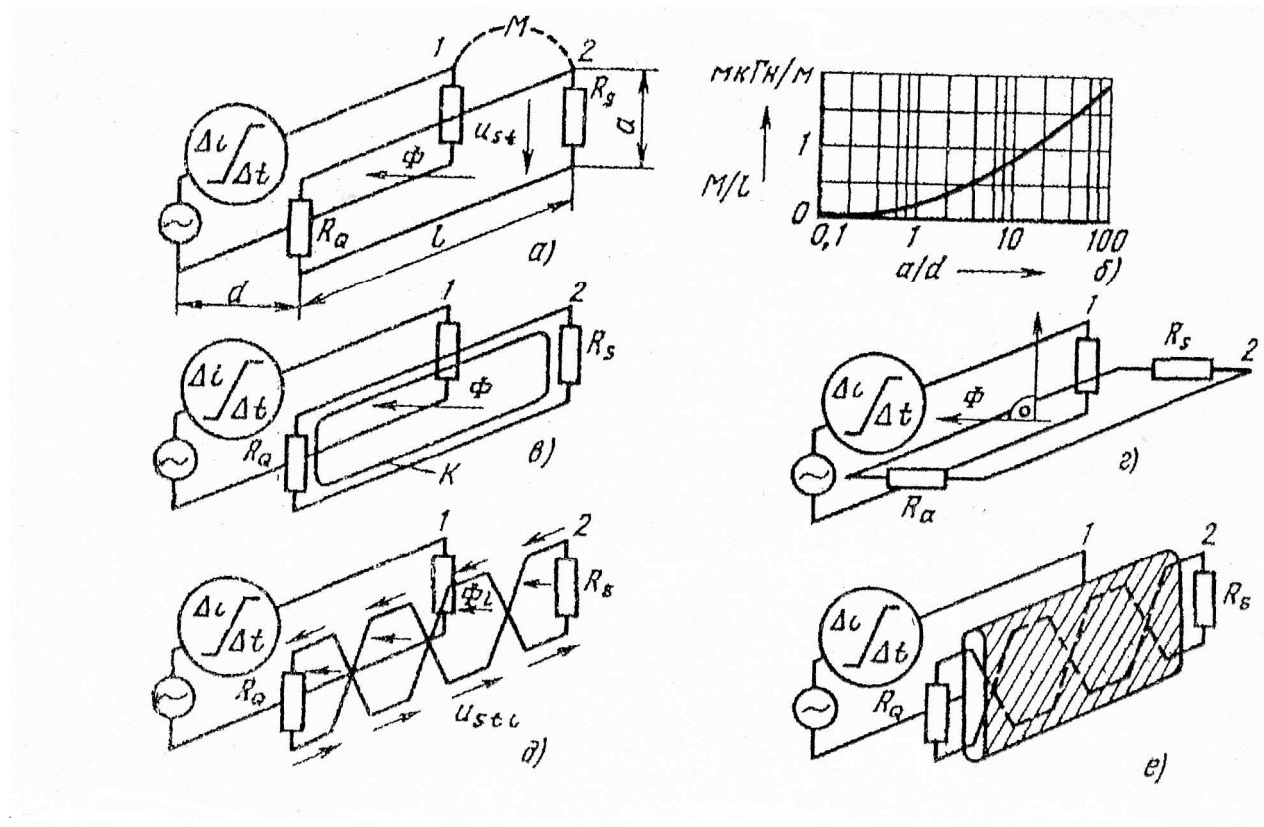


Рисунок 4.4 – Індуктивний вплив між промисловими струмовими контурами:
 а) – принципова схема двох струмових контурів 1 і 2 ;
 б) – погонна взаємна індуктивність;
 в ÷ е) – засоби по зниженню індуктивного впливу

5 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

5.1 Вплив форми кривої струму на роботу електрообладнання

В реальних електричних мережах споживачі використовують прилади з нелінійними навантажувальними характеристиками (силова електроніка, перетворювальні системи, вентильні випрямлячі, електродугові пічі та ін.), тому умови щодо дотримання оптимальних характеристик стабільності напруги і частоти не виконуються. Ця проблема потребує підвищеної уваги також внаслідок збільшення числа і потужності нелінійних електронних пристроїв для керування силовими установками, які суттєво впливають на форму кривих струму і напруги, що є наслідком генерації ними гармонік.

Відхилення форми кривої струму і напруги від правильної синусоїдальної форми представляють за допомогою гармонічних складових. Гармоніка визначається як сигнал з частотою, кратної частоті основної

гармоніки. Розрізняють гармоніки в сталому режимові, при яких форма кривої не змінюється в часі, і гармоніки в перехідних режимах, коли форма кривої суттєво змінюється від циклу до циклу.

В теперішній час другим основним потужним джерелом викривлення кривої напруги є генератори електричних станцій. Сучасні трансформатори і обертаючі машини в нормальних умовах роботи не вносять суттєвих викривлень в мережу. Але в перехідних процесах і в нештатних умовах роботи – ці викривлення можуть суттєво зростати.

Використання технологій, заснованих на широкому застосуванні керованих випрямлячів, призвело до суттєвого збільшення рівня гармонік струму в мережах.

Важливою характеристикою, яка визначає форму кривої, є фазовий кут (кут зсуву) гармоніки по відношенню до гармоніки основної частоти. Однакові гармоніки від різних джерел, розташованих під різними кутами, дають різний ефект. Невеликі споживачі, що живляться від такої мережі, підлягають небезпечному впливу гармонік на керуюче обладнання. Але застосування мінімальних засобів захисту (наприклад, фільтрів), суттєво покращує криву напруги.

Енергопостачальні компанії знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік, вводячи стандарти або рекомендації щодо обмеження гармонічних складових в точках загального підключення споживачів.

Визначення допустимого рівня гармонік є достатньо складною задачею. Проблема полягає в тому, що знання про струми гармонік різних джерел недостатні для визначення меж, у яких би забезпечувалася електромагнітна сумісність обладнання в будь-якій системі. Поки не буде досягнуто поняття характеру гармонічних явищ в складних системах, – енергозабезпечення буде знаходитися під загрозою підвищеної небезпеки.

5.2 Вплив гармонік на роботу систем електропостачання

Гармоніки суттєво впливають на усі види електричного обладнання, яке розташованого навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Найбільш небезпечний вплив гармонік проявляється в «помилкових» комутаціях відповідальної управляючої і захисної апаратури, перевантаженні силових апаратів і систем. Часто викривлення кривої напруги призводить до руйнування силових конденсаторів і виходу з ладу інших елементів мережі.

Для розрахунку гармонік струму, що їх генерують статичні силові перетворювачі, необхідні дані про форму кривої напруги змінного струму на виході перетворювача, його схема, тип система управління, повний опір мережі змінного струму і параметри ланцюга постійного струму.

В залежності від положення моменту ввімкнення одного вентиля відносно іншого при сталій роботі перетворювача, відрізняють чотири принципи управління:

- управління з постійним фазовим кутом, при включенні вентилів через рівні проміжки часу у відповідності з їх комутаційними напругами;
- симетричне управління, при якому послідовне включення вентилів здійснюється в однакові моменти синусоїди живлячої напруги;
- модульоване фазове управління, при якому включення вентилів здійснюється через змінні проміжки часу;
- інтегральне управління, яке вибирає ціле число циклів або напівциклів живлячої частоти.

Найбільш часто застосовують фазовий спосіб управління, що полягає в зміні фазового кута керуючої напруги. В цьому випадку до характеристики кривих, які виникають при фазовому і симетричному керуванні, застосовують спектральний аналіз Фур'є.

Для живлення перетворювачів використовують систему змінного струму, від якого живиться випрямляч. Гармонічний склад кривої на стороні інвертованого струму має характерні особливості.

Управління з постійним фазовим кутом використовують в нормально комутуємих статичних перетворювачах і регуляторах напруги.

Регулятори напруги змінного струму, які складаються із зустрічно-паралельно ввімкнених пар тиристорів в кожній фазі, генерують змінні по амплітуді гармоніки. При індуктивному навантаженні вони можуть містити гармоніки парних порядків і постійний струм.

Таким чином, основними джерелами гармонік струму є випрямлячі і інвертори з фазовим управлінням, які поділяються на три групи:

- потужні перетворювачі для металургії і в передачах постійного струму високої напруги;
- перетворювачі середньої потужності для промисловості та управління електромоторами і на залізниці;
- малопотужні перетворювачі однофазних пристроїв (телевізійні, та для зарядження батарей).

Форми кривих струму і напруги перетворювачів першої групи наближені до ідеальної і можуть бути прийняті за основу для отримання характеристик гармонік стандартних схем перетворювачів.

До широкого впровадження статичних перетворювачів, основними джерелами гармонік в електричних системах були намагнічуючі струми силових трансформаторів і електричних машин.

Крім статичних перетворювачів існують ще два види нелінійних навантажень – дугові плавильні пічки і люмінесцентні лампи.

Після виявлення джерела гармонік та їх рівнів, необхідно з'ясувати вплив гармонік на роботу електрообладнання. Для цього всі елементи систем електропостачання необхідно дослідити на чутливість до впливу гармонік.

Основними факторами впливу вищих гармонік на системи електропостачання є:

- зростання струмів і напруг гармонік внаслідок паралельного і послідовного резонансу;
- зниження ефективності процесів генерації, передачі і використання електроенергії;
- старіння ізоляції електрообладнання і скорочення, внаслідок цього, строку служби;
- хибна робота обладнання.

Резонанси. Наявність в мережах конденсаторів для компенсації реактивної потужності може призвести до появи місцевих резонансів, які можуть суттєво збільшити струм конденсаторів та прискорений вихід їх із ладу.

Паралельний резонанс виникає внаслідок великого опору гармонікам струму на резонансній частоті. Оскільки більшість гармонік генеруються джерелами струму, то це призводить до збільшення напруги гармонік і струмів. Паралельні резонанси можуть виникати в різних умовах, наприклад, при приєднанні конденсаторів до тих шин, до яких приєднано джерело гармонік. Вважаючи опір джерела чисто індуктивним, резонансну частоту розраховують за формулою

$$f_p = f_k \sqrt{S_{кз} / (Q + Q_L)} , \quad (5.1)$$

де Q_k – потужність силових конденсаторів і ємності живлячої мережі;
 $S_{кз}$ – потужність КЗ в точці загального приєднання (рис. 5.1).

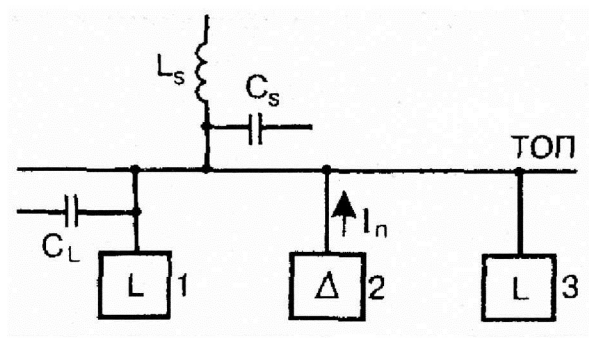


Рисунок 5.1 – Паралельний резонанс:
 $1 \div 3$ – навантаження; 2 – джерело гармонік;
ТОП – точка загального приєднання

Для визначення умов виникнення паралельного резонансу необхідно поміряти струми гармонік у ланцюгах кожного навантаження і ланцюгу живлення, а також напругу гармонік на шинах. Якщо струм, що протікає від шин в енергосистему малий а напруга велика, – це свідчить про наявність резонансу між L_s і C_L , C_s .

Послідовний резонанс виникає при наявності викривлень на шинах джерела живлення (рис. 5.2). На високих частотах опір навантаження можна не враховувати, а опір конденсаторів різко зменшується. Резонансна частота для цього ланцюга визначається за формулою

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_T}{(Q_k U_{кз})^2} 100 - \frac{P^2}{Q_k^2}}, \quad (5.2)$$

де Q_k – потужність силових конденсаторів; S_T – потужність трансформатора; $U_{кз}$ – напруга короткого замикання трансформатора; P_n – потужність навантаження.

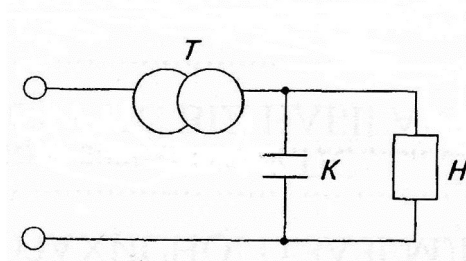


Рисунок 5.2 – Схема послідовного резонансу

При послідовному резонансі великий струм гармонік може протікати через конденсатор при відносно малій напрузі гармоніки. Дійсна величина струму визначається добротністю контуру яка зазвичай, дорівнює порядку 5 на частоті 500 Гц. Резонанси в системах електропостачання розглядаються відносно до силових конденсаторів.

Обертаючі машини. Гармоніки напруги і струму призводять до додаткових втрат енергії в обмотках статора, в ланцюгах ротора і в сталі ротора і статора. Завдяки вихровим струмам і поверхневого ефекту, втрати в проводах статора і ротора більші за омичні. Додаткові втрати виникають від струмів витoku, обумовлені гармоніками в торцевих зонах статора і ротора.

У асинхронного двигуна з ротором із скошеними пазами і пульсуючими магнітними потоками в статорі і роторі вищі гармоніки додають втрат в сталі, які залежать від характеристик матеріалу магнітопроводу і кута скосу пазів. Так у двигуна потужністю 16 кВт на частоті 60 Гц при номінальному навантаженні при синусоїдальній формі кривої напруги повні втрати склали 1,3 кВт, а при квазіпрямокутній формі – 1,6 кВт.

Розподіл втрат від вищих гармонік в двигунах постійного струму складає:

- в обмотках статора – 14,2 %;
- в ланцюгах ротора – 41,2%;
- в торцевих зонах – 18,8%;
- потоки в пазах – 25,8%.

При цьому, сусідні непарні гармоніки в статорі синхронній машині визивають в роторі гармоніку однакової частоти: – так 5-а і 7-а гармоніки

визивають в роторі гармоніки струму 6-го порядку, які обертаються в протилежні сторони.

Середня щільність втрат на поверхні ротора пропорційна $(I_5^2 + I_7^2)$, але завдяки різному напрямку обертання, вона пропорційна $(I_5^2 + I_7^2)^2$.

Додаткові втрати – це найбільш небезпечний фактор у обертальних машинах, обумовлений гармоніками, які призводять до загального підвищення температури і місцевого перегріву ротора. Причому, машини з фазним ротором більш чутливі до виникнення гармонік.

Допустимість гармонік визначають по величині напруг і струмів зворотної послідовності, які вони генерують.

Лінії електропередач. В ЛЕП поява гармонік призводить до додаткових втрат електроенергії і напруги. Зокрема, в кабельних лініях гармоніки напруги збільшують (посилюють) дію на діелектрик – пропорційно збільшенню максимальної амплітуди напруги. Це призводить до зростання числа пошкоджень кабелю і збільшення вартості ремонту.

В лініях надвисокої напруги (НВН) гармоніки по тій же причині збільшують втрати електроенергії на корону.

Трансформатори. Гармоніки напруги в трансформаторах призводять до зростання втрат електроенергії:

- на гістерезис;
- втрат, обумовлених вихровими струмами в сталі;
- втрат в обмотках;
- втрат в діелектричних матеріалах трансформатора.

Це призводить до скорочення строку служби трансформаторів.

Втрати в обмотках найбільш суттєві у випадку використання перетворювальних трансформаторів, оскільки наявність фільтра, ввімкненого на стороні змінного струму, не знижує гармонік струму в трансформаторі.

Це потребує використання трансформаторів підвищеної потужності.

Важливим фактором впливу гармонік на потужні трансформатори є циркуляція потроєного струму нульової послідовності в обмотках, які з'єднані в трикутник, що може призвести до їх перевантаження.

Батареї конденсаторів. При перевищенні гармоніками допустимого рівня, конденсатори через деякий проміжок часу виходять з ладу.

Додаткові втрати енергії в конденсаторах розраховують за формулою

$$\delta P = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_0 \omega C n U_n^2, \quad (5.3)$$

де ΔP_0 – питомі втрати на основній частоті; C – ємність конденсатора;

U_n – напруга n -ної гармоніки.

Ці втрати призводять до додаткового нагріву конденсаторів.

Всі конденсатори розраховані на певне струмове перевантаження:

- у США – 80%;
- у Великобританії – 15%;
- у Європі – 30%;
- у РФ – 30%.

Перевищення цих значень при наявності підвищених напруг гармонік на вводах конденсаторів, призводить до їх перегрівання і прискореного виходу з ладу.

5.3 Вплив гармонік на системи релейного захисту

Гармоніки можуть порушувати роботу систем захисту і погіршувати їх характеристики. Цифрові реле і алгоритми, засновані на аналізі вибірки даних, або точки перетинання нуля особливо чутливі до гармонік.

Електромагнітні реле в більшості випадків своїх характеристик не змінюють аж при коефіцієнті викривлення \approx до 20%.

Вплив гармонік відрізняється при роботі системи в нормальному і аварійному режимах.

В аварійних режимах електромеханічні реле, які використовуються в максимальному струмовому захисту, реагують на напругу і струм основної частоти і мають високу інерційність, що робить їх нечутливими до впливу вищих гармонік.

Більший вплив гармонік на роботу систем захисту відбувається у пристроях, заснованих на вимірюванні опору. Дистанційний захист, заснований на вимірі опору на основній частоті, може давати суттєві похибки при наявності в струмі КЗ вищих (особливо 3-го порядку) гармонік.

Велика кількість гармонік спостерігається, якщо струм КЗ протікає через землю і якщо гармоніки не фільтрують, – то можливий збій в роботі системи.

При металевому КЗ у струмі і напрузі переважає основна частота, але завдяки насиченню трансформатора струму, виникає вторинне викривлення кривої, особливо у випадку великої аперіодичної складової у первинному струмові. При цьому також виникають проблеми в роботі системи захисту.

У сталому режимові роботи нелінійності, пов'язані з перезбудженням трансформатора струму, генерують гармоніки непарного порядку, а в перехідних режимах виникають будь-які гармоніки, причому найбільша амплітуда – у другій і третій.

Фільтрація гармонік в цифрових системах найбільш важлива для дистанційного захисту. Розроблені сучасні цифрові способи фільтрації частот, не зважаючи на деяку складність алгоритму, призводять до позитивного результату.

В нормальних режимах вплив гармонік на системи захисту роботи електричних мереж, завдяки низької чутливості пристроїв захисту до параметрів режиму, – незначний. Але при підключенні до мережі потужних трансформаторів спостерігається кидок намагнічуючого струму.

Не зважаючи на дуже високій пік намагнічуючого струму, великий зміст вищих гармонік в намагнічуючому струмові трансформатора, його використовують для блокування відключення вимикачів ВН. Амплітуда струму залежить від індуктивності трансформатора, опору обмотки і моменту часу, в який відбувається включення. Оскільки струм вторинної обмотки в період намагнічування відсутній, то великий первинний струм може призвести до помилкового спрацьовування диференційного захисту.

5.4 Вплив гармонік на обладнання споживачів

Телевізори: вплив гармонік полягає у збільшенні піка напруги, що може призвести до викривлення зображення і зміни яскравості зображення.

Розрядні лампи: пуско-регулюючі пристрої цих ламп містять ємність і індуктивність, що може призвести до виникнення резонансу і виходу ламп з ладу.

Комп'ютери: встановлені межі на допустимі рівні викривлення в мережах, живлячих комп'ютери і системи обробки даних (для комп'ютера IBM вони складають $\sim 5\%$).

Перетворювальне обладнання: провали на синусоїдальній напрузі при комутації вентилів, можуть впливати на синхронізацію іншого подібного обладнання, керування яким відбувається в момент переходу кривої напруги через нуль.

Обладнання з тиристорними регуляторами. Наявність гармонік може впливати наступним чином:

- провали на синусоїді напруги призводять до неправильної роботи завдяки пропускам ввімкненням тиристорів;
- гармоніки напруги можуть призвести до ввімкнення їх в непотрібний момент часу;
- резонанс між різними типами обладнання може призвести до виникнення перенапруг і «качанням» машин.

Споживачі, що живляться від різних шин, теоретично можуть впливати один на одного, але їх віддаленість знижує ймовірність такого впливу.

Вплив на прилади вимірювання потужності і енергії. Всі вимірювальні прилади калібровані при чисто синусоїдальній напрузі і струмі, тому при вимірюванні потужності при наявності викривлень струму і напруги, можлива поява погрішності – більшої за нормовану. Наявність гармонічних викривлень також впливає на точність комерційних розрахунків за електроенергію.

Дослідженнями доведено, що погрішності вимірів, обумовлені вищими гармоніками, змінюються в широких межах і можливі як позитивні, так і негативні погрішності. В розповсюджених індукційних лічильниках електромагнітної системи містяться елементи, що створюють первинний і вторинний магнітні моменти, які є нелінійними по відношенню до частоти і амплітуди напруги. З'ясувалося, що індукційні лічильники завишають споживану потужність (до 6%), внаслідок слабого демпфірування в інтервали відсутності струму. Такі споживачі автоматично є потерпілими за внесення в мережу викривлень форми напруги. Тому вони повинні бути зацікавленими в застосуванні засобів придушення гармонік.

Точний вимір енергії незалежно від форми кривих струму і напруги забезпечує електронний лічильник.

Гармоніки впливають і на точність вимірювання реактивної потужності, яка точно визначена лише для синусоїдальних струмів і напруг, а також і на точність виміру коефіцієнта потужності.

6 КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ НА ОБ'ЄКТАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

6.1 Задачі контролю електромагнітної обстановки

Електромагнітна обстановка (ЕМО) на об'єктах електроенергетики характеризується напруженістю електричних і магнітних полів, а при високих частотах – і електромагнітного поля. Найбільший інтерес має дія плоскої електромагнітної хвилі, у якій щільність електричної і магнітної складових рівні. Розрізняють природну електромагнітну обстановку і обстановку від електричних або електроенергетичних пристроїв. Поля природного і штучного походження накладаються одне на одного, а їх вектори напруженості складаються.

Електричне поле Землі обумовлено негативним надмірним зарядом поверхні і сягає на відкритій місцевості приблизно $100 \div 500$ В/м. При появі грозової хмари напруженість поля може зрости до десятків і навіть декілька сот кВ/м, а при розрядах виникають імпульси і електромагнітного поля.

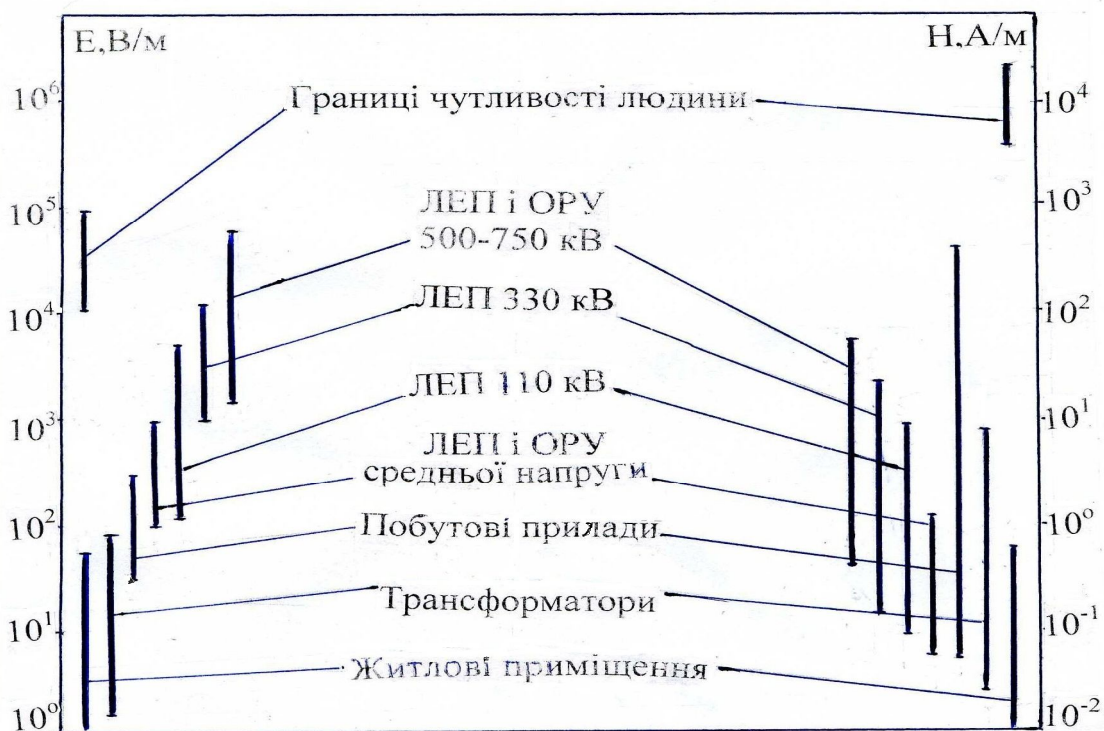


Рисунок 6.1 – Напруженість електричних і магнітних полів промислової частоти

Сильні електричні поля промислової частоти в основному утворюються об'єктами електроенергетики (ЛЕП ВН). Будівлі і споруди екранують постійне електричне поле Землі і електричне поле промислової частоти, створене ЛЕП ВН та іншими об'єктами. В середині будівлі постійне

електричне поле природного і штучного походження визначається наявністю електризуючихся природних і синтетичних матеріалів. Напруженість електростатичного поля у приміщенні може досягти десятків і сотен кВ/м (рис. 6.1).

При розрядах статичної електрики виникають електромагнітні імпульси з дуже високої крутизною. З'являються сильні електричні поля і поблизу приладів, які не мають спеціального захисту і використовують високу постійну напругу.

Постійне магнітне поле Землі утворюється струмами в середині неї. Воно орієнтовано відносно магнітних полюсів, а його напруженість залежить від географічних координат і досягає 55,7 А/м у магнітних полюсів і 33,4 А/м у магнітного екватора, де вектор напруженості паралельний поверхні Землі.

В середніх широтах напруженість поля складає приблизно 40 А/м.

На постійне поле накладається геомагнітне поле Землі, створене струмами в магнітосфері і іоносфері. Воно повільно змінюється і містить широкий спектр частот, в тому числі низькочастотну (до 100 Гц) складову, напруженість якої $\sim 0,1$ А/м, яка при магнітних бурях значно зростає.

Геомагнітні постійні і низькочастотні поля, на відміну від електричних, не екрануються стінками будинків і іншими об'єктами. Всередині споруд, що мають сталевий каркас, напруженість геомагнітного поля зменшується в декілька разів.

Типові напруженості електричного і магнітного полів на об'єктах енергетики, що призводять до порушення ритму роботи серця, наведені в таблиці 6.1, згідно даних ВОЗ, IRPA, I DIN VDE (німецькі індустриальні норми Союзу німецьких електротехніків).

Таблиця 6.1 – Електромагнітна обстановка на об'єктах електроенергетики

Назва об'єкта або параметра	Напруженість електричного поля, В/м	Напруженість магнітного поля, А/м
ОРУ 500, 750 кВ	$103-5 \cdot 10^4$	10–100
ВЛ 380 кВ	$103-10^4$	1–40
ВЛ 330 кВ	$103-5 \cdot 10^3$	10–100
ВЛ 110 кВ	$102-3 \cdot 10^3$	0,1–20

Таким чином, сильні електричні поля промислової частоти утворюються об'єктами електроенергетики (ЛЕП ВН, зборні шини підстанцій, трансформатори і апарати ВН).

Напруженість поблизу ВЛ 220 кВ і вище може сягати границі індивідуальної чутливості поля, коли людина по деяким ознакам може встановити присутність поля.

Напруженість електричних полів, що їх створюють побутові електроприлади, приводи систем живлення, – по амплітуді менша за природну напруженість постійного поля Землі. Таким чином, магнітна обстановка всередині приміщень визначається, головним чином, постійним

полем Землі, на яке накладаються змінні поля від об'єктів електроенергетики. Амплітуда цих полів має такий же порядок величин, як і змінна складова природного поля Землі.

Напруженість магнітного поля промислової частоти всередині приміщень може бути досить високою, якщо поблизу розташована ВЛ електропередачі, прокладені кабелі або розташовані потужні електротехнічні пристрої.

Напруженість поля від ЛЕП, навіть на відстані декілька сот метрів від лінії, може досягати десятої долі А/м.

Кабельні лінії створюють більшу напруженість біля них, ніж повітряні, але напруженість зменшується інтенсивніше при віддаленні від кабелю і зона напруженості (десятих часток А/м) не перевищує декількох десятків метрів.

Кабелі і ВЛ напруги 6÷10 кВ, завдяки малій відстані між фазами, створюють незначні напруженості поля і в приміщеннях ними можна нехтувати.

Поле трансформаторів системи електропостачання змінюється зворотно пропорційно відстані і може бути зафіксовано на відстані менш, ніж 10 м.

Мережі низької напруги створюють поле, залежне від не симетрії навантаження фаз і його напруженість зворотно пропорційна відстані і може бути зафіксована на відстані до 20 м.

У виробництві на робочих місцях напруженість магнітного поля промислової частоти може бути значно більшою. В екстремальних випадках, наприклад, поблизу зварювального апарата, електродугової пічки, або безпосередньо біля проводів потужних ВЛ при роботі під напругою, персонал може бути під напруженістю 1÷10 кА/м, що на два порядки перевищує напруженість поля Землі. Отже, напруженість магнітних полів значно менша порога чутливості людини.

Новим фактором, не притаманним природній обстановці, є поява ВЧ електромагнітних полів, які генеруються пристроями зв'язку, телекомунікацій, радіолокаційною технікою, мікрохвильовими апаратами і т. п. Напруженість цих полів мала порівняно до розглянутих і вони частково або повністю екрануються провідними стінками.

В житлових приміщеннях при сучасному виконанні мережі електроживлення, відсутності струмових петель, пов'язаних із заземленими системами водопроводу, опалення і т.п., напруженість поля визначається природнім магнітним полем, але не перевищує десятих часток А/м.

Вплив ВЧ полів на людину (наприклад радіотелефонний зв'язок) – потребує подальших ретельних досліджень.

Напруженість магнітного поля промислової частоти при ввімкненні електроприладів, не перевищує одного процента від напруженості постійного поля Землі. Вона має той же порядок, що і змінна складова природного поля Землі.

Таким чином, організм людини практично не відчуває впливу полів, тому електромагнітна обстановка в побуті не може трактуватися як

електросмог. Винятком є випадок використання потужних електроприладів, розташованих безпосередньо поблизу людини (праска, фен, електроінструмент).

На об'єктах електроенергетики напруженість електричного і магнітного полів можуть у десятки разів перевищує напруженості полів природного походження, тому потребує більш ретельного розгляду. В результаті проведених досліджень повинні бути визначені максимальні значення впливу полів на системи релейного захисту та технологічного управління при нормальному і аварійному режимах роботи обладнання.

6.2 Методи визначення інтенсивності електромагнітних полів

Для визначення ЕМО необхідно провести ряд вимірів і розрахунків, необхідних для отримання даних про максимальний рівень електромагнітних полів, наведених струмів і напруг, розрядів статичної електрики та ін., та їх вплив на системи релейного захисту і управління електроенергетичних об'єктів при нормальних та аварійних режимах.

Для отримання достовірних даних числового аналізу, крім розрахунків, необхідно проведення натурних і імітаційних експериментів. Імітація електромагнітних збуджень суттєво розширює можливості визначення рівня електромагнітних перешкод, оскільки можливості натурних експериментів на діючому об'єкті обмежені.

Імітація електромагнітних збуджень, суттєво розширює можливості по визначенню рівня електромагнітних перешкод. В результаті роботи необхідно визначити максимальні значення рівня перешкод, які впливають на системи релейного захисту і технологічного управління при нормальному і аварійному режимах, і які повинні нормально функціонувати при любых режимах.

Роботи по визначенню ЕМО на об'єктах складаються з таких етапів:

- отримання вихідних даних об енергооб'єкті;
- експериментально-розрахункове визначення ЕМО на об'єкті;
- визначення відповідності між рівнями стійкості пристроїв і ЕМО на об'єкті.

Для визначення рівня електромагнітних перешкод на системах релейного захисту і технологічних системах управління на шинах високої напруги необхідно знати:

- електричну схему і розташування первинних ланцюгів; траси прокладки кабелів та їх типи;
- тип і розташування силового обладнання;
- призначення і розташування релейного захисту і системи технологічного управління;
- конструкцію заземлюючих пристроїв (питомий опір ґрунту і імпульсний опір заземлення обладнання, до якого надходять кабелі пристроїв релейного захисту);
- для визначення дії струмів і напруг промислової частоти необхідно мати дані про струми короткого замикання на землю (струми $3I_0$).

Ці дані можуть бути отримані лише шляхом експерименту.

Для визначення впливу електромагнітних полів радіочастотного діапазону необхідні дані про наявні на об'єкті радіопередавальні пристрої.

Аналіз рівня електромагнітного впливу по мережах електроживлення постійним і змінним струмом здійснюється на основі виконавчої схеми живлення об'єкта, типах і місці розташування пристроїв, ввімкнених у схему живлення, даних про трасу прокладки і типи кабельних ліній.

На цьому етапі складається робоча програма проведення експериментальних досліджень на енергооб'єкті.

При проведенні вимірів на об'єкті визначають напруженість електромагнітних полів радіочастотного діапазону, напруженість поля промислової частоти при нормальних режимах, імпульсні перешкоди в ланцюгах постійного і змінного струму, якість електроспоживання постійним і змінним струмом систем релейного захисту і технологічного управління, характеристики покриття підлоги і електричні потенціали тіла людини від заряду статичної електрики.

При імітації електромагнітних збуджень визначають перешкоди від ударів блискавки, коротких замкнень, комутацій в первинних ланцюгах. Після вимірів здійснюють перерахунок отриманих даних до реальних умов.

При цьому визначають ряд інших параметрів, наприклад коефіцієнт екранування кабелів, які неможливо визначити розрахунками. Розраховують також найбільш небезпечні режими на основі результатів вимірів, використовуючи відповідні програми для ЕВМ.

Необхідно враховувати коефіцієнт екранування електромагнітного поля блискавки, оскільки, зазвичай, застосовують екрановані кабелі, проложені в металевих коробах.

Принцип дії екрану полягає в тому, що електромагнітне поле індукуює в екрані струм, магнітне поле якого компенсує діюче поле. В залежності від співвідношення довжини кабелю l і довжини хвилі λ , цей струм замикається різними шляхами. При $\lambda > l$ струм в екрані замикається через заземлення на кінцях екрана і землю, а при $\lambda < l$ – безпосередньо в самому екрані.

Блискавка генерує електромагнітні поля частотою ~ 1 МГц, що відповідає довжині хвилі $\lambda = 300$ м. Оскільки довжина кабельних ліній вторинних ланцюгів не перевищує цю величину, то струм в екрані замикається через заземлюючі екрани провідника і ґрунт. Коефіцієнт екранування $k > 1$ для лінії із заземленим з обох сторін екраном визначається з виразу

$$k = \frac{R_Q + R_E + j\omega L_E}{Z_t l + j\omega L_g}, \quad (6.1)$$

де l – довжина системи; $Z_t = (R_E + j\omega L_t) / l$ – погонний передаточний опір; R_E – активний опір екрану; $L_t = M_{IE} - L_E$ – передаточна індуктивність; L_E – індуктивність екрану; M_{II} – взаємна індуктивність між екраном і жилою; R_Q – опір шляху протіканню струму в землі; L_Q – особиста індуктивність заземлюючих провідників екрану.

При наявності декількох екранів здійснюють перемноження їх коефіцієнтів екранування.

Для визначення можливого зворотного перекриття із землі на кабелі, здійснюють вимір розподілу потенціалів по землі при ударі блискавки в блискавкоприймач за допомогою вимірювального комплексу ИК-1.

На ВРП генератор імпульсів струму підключають між заземленням блискавкоприймача і заземленим стрижнем на відстані не менш 50 м від блискавкоприймача. Після імітації удару блискавки вимірюють потенціали на землі поблизу кабельних каналів відносно точки, що знаходиться на відстані не менш 50 м.

Для будівель і споруд генератор підключають до блискавкоприймача зверху будівлі і до землі на відстані не менш 20 м від споруди. Після цього здійснюють імітацію удару блискавки в блискавкоприймач та вимірюють потенціал в споруді і перераховують його на реальний струм блискавки, використовуючи програму ОРУ-М.

Магнітні поля промислової частоти. Вимірювання магнітних полів частоти 50 Гц здійснюють в нормальних режимах біля установок автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління на розподільчому пристрою ВН вздовж траси прокладки кабелів за допомогою вимірювача магнітного поля (ИПМ-5-/200/400), який входить до комплексу КДЗ-1.

Для режимів однофазного КЗ на шинах ВН рівень напруженості магнітних полів визначають розрахунком. Приблизну оцінку роблять за формулою

$$H = I_{\text{кз}} / 2\pi r, \quad (6.2)$$

тут r – відстань до шин, по яким тече струм $I_{\text{кз}}$ однофазного КЗ.

Якщо поблизу автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління розміщені реактори або трансформатори, вимірюють напруженість магнітного поля в нормальному режимі і перераховують на струми КЗ. Розрахунок поля вздовж осі реактора здійснюють за наближеною формулою

$$H = \frac{I \cdot n}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1.5}}, \quad (6.3)$$

де r – радіус реактора, x – відстань по осі реактора від його центру до точки виміру, I – струм в реакторі, n – число витків.

Для декількох реакторів результуюче поле визначається методом суперпозиції полів кожного реактора з врахуванням фазового зсуву струмів. Для розрахунку можна використовувати відому програму MathCAD.

Перешкоди, пов'язані із збуреннями в ланцюгах НН. Основними періодичними перешкодами в ланцюгах постійного струму є змінна складова напруги (пульсації) і кондуктивні перешкоди радіочастотного діапазону.

Імпульсні перешкоди в ланцюгах постійного струму виникають при комутації реле, електромагнітів, автоматичних вимикачів в ланцюгах постійного струму.

Основними періодичними перешкодами в ланцюгах живлення змінного струму є гармонічні складові напруги.

Імпульсні перешкоди в ланцюгах змінного струму виникають при комутації автоматичних вимикачів в цих ланцюгах.

Вимірювальну апаратуру при визначенні перешкод приєднують до ланцюгів живлення по протифазній схемі (провід-провід), а в разі потреби – і в синфазній (провід-земля). При цьому:

- осцилографують форму сигналу перешкоди (короткотривалі виміри);
- здійснюють тривалу реєстрацію при комутаціях в ланцюгах ВН.

При вимірюваннях в стаціонарних режимах визначають характеристики пульсацій або коефіцієнт синусоїдальності змінної напруги.

Вимірювання перешкод, які виникають при комутації реле, здійснюють при примусовій їх комутації безпосередньо у місцях розташування реле або на щиті особистих нужд.

Вимірювання перешкод в ланцюгах оперативного струму при спрацьовуванні електромагнітних приводів силових вимикачів здійснюють в місцях розташування систем релейного захисту і технологічного управління.

Тривалу реєстрацію проводять з метою визначення діапазону характеристик перешкод в тривалих режимах роботи. Тут визначають амплітуду змінних і імпульсних перешкод в ланцюгах постійного струму і гармонічних складових та імпульсних перешкод в ланцюгах змінного струму.

Вимірювання здійснюють тривалістю не менш одного тижня самописцями або спеціалізованими регістраторами параметрів якості електричної енергії.

В мережі живлення аналізують також аварійні режими і визначають можливі рівні пульсацій в мережі постійного струму та максимальну тривалість провалів напруги.

Розрахунок напруженості імпульсних магнітних полів здійснюють для умов протікання струму блискавки по блискавководу або струмовідводам блискавкоприймачів будівель і споруд, розташованих поблизу пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління.

Оцінку напруженості полів здійснюють за формулою

$$H = I_m / 2\pi r, \quad (6.4)$$

де r – відстань до блискавкоприймача або струмовідводу, по якому протікає весь стум блискавки I_B .

За результатами вимірювань і розрахунків складають протокол (див. дод. А), в якому рівні електромагнітних збуджень, що впливають на автоматичні і автоматизовані системи технологічного управління, порівнюють з випробувальними рівнями для таких систем. На основі проведених порівнянь роблять висновок про стійкість систем автоматичного і автоматизованого управління до дії перешкод.

6.3 Екологічний вплив полів на персонал

Живі організми функціонують завдяки протіканню в них різноманітних процесів: фізичних, хімічних, біологічних основу яких складають електричні явища на молекулярному і клітинному рівні.

Внутрішнє середовище живого організму є електропровідним, оскільки являє собою водні електроліти, по яким циркулюють електричні струми, які збуджують і регулюють усі життєво важливі процеси. Самі струми збуджуються електричними полями, які утворюються іонами, концентрація яких залежить від виду хімічних реакцій, що відбуваються в організмі. Електричні процеси в тканинах відіграють вирішальну роль в функціях руху м'язових тканин в яких, внаслідок складних біохімічних процесів, відбувається перетворення енергії електричного поля в механічний рух.

Функціонування клітин організму обумовлено обміном речовин через мембрани, скрізь які проходять іони натрію, калію хлору і інших елементів. Відкриття каналів в мембрані відбувається за рахунок електростатичних сил, які виникають внаслідок різниці концентрації іонів всередині та зовні клітини і діють на білкові молекули мембрани. Зміна концентрації іонів зовні і всередині клітини і реакція мембрани завдяки зміни напруги між її стінками, є важливими елементами механізму електрохімічної передачі інформації по тканинам.

В спокійному стані напруга потенціалу складає приблизно 80 мВ, а для відкриття каналів мембран необхідно зменшити напругу на 20 мВ

Нормальному стану організму відповідає напруженість поля людини ~ 40 В/м і щільність струму 4 А/м². Якщо штучно створити всередині людини таке поле або струм, то будуть порушені природні процеси функціонування органів і, наприклад, може відбутися параліч серцевої м'язи.

Поле всередині людини може виникнути при безпосередньому торканні до струмопровідних частин, або за рахунок протікання по тілу струмів зміщення, якщо людина знаходиться в змінному електричному полі, або в полі індукованих струмів, чи змінному магнітному полі. Такі напруженості поля всередині тіла людини можуть виникнути при наявності зовнішнього електричного поля промислової частоти ~ 100 МВ/м, або магнітного поля ~ 1 МА/м, що на практиці не зустрічається.

При знаходженні в електричному, магнітному або електромагнітному змінному полі в організмі людини індуктуються струми, які накладаються на особисті біоструми, внаслідок чого можуть змінитися природні процеси або з'явитися нові явища.

Змінні електричні і магнітні поля сприяють виникненню струмів зміщення і індукованих струмів. Електромагнітні поля ВЧ також індукують струми в організмі, що безумовно впливає на процеси в тканинах.

Електричні, магнітні і електромагнітні поля все більш впливають на навколишнє середовище, тому з'явилося нове визначення цього явищу – електросмог.

Постійні зовнішні електричні поля не призводять до появи струмів в організмі. Основний вплив на забруднення середовища електричними і магнітними полями промислової частоти здійснюють об'єкти електроенергетики, насамперед, лінії електропередач і підстанції високої напруги, електрифікований транспорт, промислові установки і численні побутові прилади. Розвиток електроенергетики супроводжується застосуванням потужних електротехнічних і електронних пристроїв в промисловості, транспорті і побуті, тому напруженості електричних і магнітних полів можуть перевищувати природні поля.

Вплив електромагнітної обстановки на стан здоров'я людини в останні роки потребує ретельного дослідження, оскільки з'явилися повідомлення про підвищену небезпеку ракових захворювань у людей, що тривалий час мешкають поблизу ліній електропередач високої напруги, а також скарги персоналу електроенергетичних комплексів напругою більше 220 кВ на самопочуття на робочих місцях.

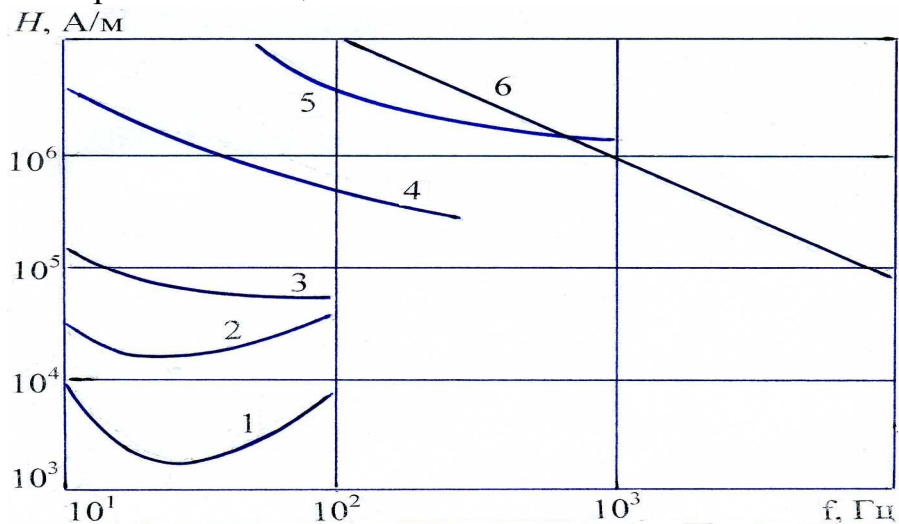


Рисунок 6.2 – Ефекти впливу магнітного поля різної частоти на організм людини:

- 1 – поява мерехтіння на периферійних ділянках поля зору; 2 – відчуття присутності поля; 3 – реєстрація порушення зору, головні болі; 4 – порушення роботи серця; 5 – порушення нервової системи; 6 – джоулеве тепло нагріву тканин при потужності ~ 4 Вт/кг

З рисунку 6.2 видно, що криві 1 та 2 мають мінімум в діапазоні промислових частот, а зростання кривих із збільшенням частоти, пояснюється інерційністю системи відкриття каналів в стінках клітинних мембран, а при зменшенні частоти – зниженням індукованих струмів.

Величина напруженості магнітного і електричного полів, які відчуває людина, знаходяться вище тих, що існують в побуті і на виробництві. Якщо напруженість електричного поля частотою 50 Гц може спостерігатись під проводами ЛЕП або на території ОРУ НВН, то відповідна напруженість магнітного поля може бути отримана тільки в спеціальних умовах.

Другим науково встановленим механізмом дії полів на організм людини, є нагрів тканин при протіканні через них ємнісних або індукованих струмів. Вважають безпечним для організму нагрів тканин на 1°C , чому відповідає питома потужність $4\text{ Вт на } 1\text{ кг маси тіла}$. При такій потужності система терморегуляції організму спроможна забезпечити відвід тепла в навколишнє середовище без небезпечного підвищення температури внутрішніх органів.

При частоті 50 Гц напруженість зовнішнього електричного поля може забезпечити питому теплову потужність $\sim 4\text{ Вт/кг}$, що складає 4 МВ/м , тобто перевищує електричну міцність повітря.

Напруженість магнітного поля, яка необхідна для виділення такого тепла в організмі, складає $\sim 50\text{ МА/м}$.

Розряди статичної електрики. При імпульсному розряді статичної електрики у вигляді іскри, виникають перехідні напруги і струми, обумовлені перехідними електричними і магнітними полями, які призводять до виникнення функціональних перешкод в комп'ютерах, телефонах і інших електронних приладах, а також можливим пошкодженням напівпровідникових елементів електронних систем. Джерелом перешкод можуть бути люмінесцентні лампи низької напруги, що використовуються в домашньому побуті.

Електростатичні заряди виникають при доторканні до пластмасового елемента, завихренні пилу, терті повітря з літаючим об'єктом, ходьбі по синтетичному покриттю, вставанні зі стільця та ін. Зазвичай, при ходьбі по ковдрам потенціали досягають величини $5 \div 15\text{ кВ}$ (рис. 6.3).

В залежності від типу матеріалу діелектрика, заряди мають позитивний або негативні знак, а в залежності від взуття, покриття полу, вологості повітря людина може заряджатися до 30 кВ , що призводить до виникнення розрядів між об'єктом і людиною, – а це висуває відповідні вимоги до ЕМС. Накопичена енергія, в залежності від ємності зарядженого тіла ($50 \div 150$) пФ може складати декілька десятих частин Дж.

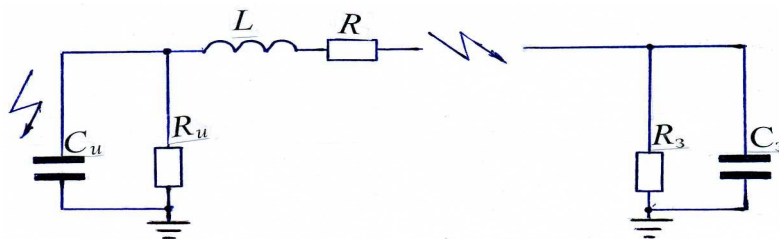


Рисунок 6.3 – Схема заміщення ланцюгу розряду тіла людини через зарядженого провідного предмета:

C_u, R_u – еквівалентні параметри статично зарядженого тіла;

R – послідовний опір;

C_3, R_3 – ємність і опір по відношенню до землі об'єкта, через який здійснюється розряд

Опір R залежить від джерела перешкод і для людини дорівнює ~ 1 кОм, а для меблі – від 10 до 50 Ом. При $C_3 \rightarrow \infty$, $R_3 \rightarrow 0$, (розряд біля землі), а індуктивність ланцюгу розряду 1 мкГн/м, то отримаємо: $R_n \gg \omega L$, тобто розряд затухає аперіодично з постійною часу $T = C_u, R_n$.

При умові $R_n \ll \omega L$, відбувається коливальний розряд з частотою $f = 1/2\pi\sqrt{LC_u}$ (6.4).

Найбільші проблеми виникають при швидкому імпульсному розряді між зарядженими тілами зі швидкістю наростання в наносекундному або субнаносекундному діапазоні. Саме імпульсні розрядні струми і виникаючі при цьому змінні магнітні поля, призводять до шкідливих електромагнітних впливів. Час зростання струму оцінюють постійною часу L/R_n , а крутизна фронту струму досягає декількох десятків ампер в наносекунду при амплітудах струму $2 \div 50$ А.

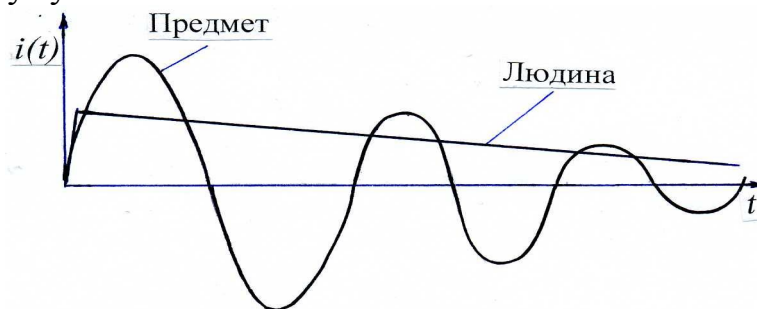


Рисунок 6.4 – Крива зміни струму при розряді тіла людини

При розряді з тіла людини інтенсивність іскри залежить від площі контакту (пальця або більшої частини тіла). Іскра має сильні нелінійні властивості і в деяких випадках (потенціалі, нижчим за 8 кВ) переривається на короткий час, а потім знову запалюється внаслідок притоку енергії із сусідніх ділянок. При цьому форма кривих струму має складний характер, тобто містить безліч гармонік.

Електростатичний потенціал тіла людини визначають шляхом безпосередніх вимірювань, попередньо визначаючи характеристики діелектричного покриття підлоги. Вимірювання питомих поверхневих опорів полімерних діелектриків здійснюють у відповідності з ГОСТ 64433.3-71 «Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричного опору при постійній напрузі».

Вимірювання здійснюють тераомметром зі стандартними електродами. Розрахунок питомого поверхневого опору ρ_n здійснюють за виразом

$$\rho_n = \frac{\pi(D+g)R_g}{g}, \quad (6.5)$$

де R_g – виміряний опір; D – діаметр електроду; g – зазор між потенційним і вимірювальним електродами.

Потенціал тіла людини вимірюють електростатичним вольтметром (С502) з робочим діапазоном $0,4 \div 3$ кВ (для розширення діапазону використовують ємнісні дільники).

Потенціал розраховують за формулою

$$U_p = [(C_1 + C_2) / C_1] \cdot U_v, \quad (6.6)$$

де C_1 – сумарна ємність вольтметра, кабелю і оператора; C_2 – ємність дільника; U_v – покази вольтметра.

Таким чином, напруженості електричного або магнітного полів, які спроможні підвищити температуру тіла на безпечну величину порядку 1°C , – на багато порядків перевищують граничну величину чутливості полів людиною, які існують на практиці.

При високих частотах ситуація інша, оскільки індуковані струми при збільшенні частоти зростають.

6.4 Нормування безпечних для людини напруженості полів

Процес нормування безпечної для здоров'я людей напруженості електричного і магнітного полів та потоку потужності ВЧ полів, є дуже актуальним. Спостерігаються тенденції встановлення більш жорстких норм шляхом введення більших коефіцієнтів запасу і дослідження можливості виявлення ще не встановлених механізмів впливу на здоров'я людини, (наприклад, слабих, але тривало діючих полів промислової частоти) і визначити реальну небезпеку таких полів для здоров'я людини.

Процес перегляду норм щодо впливу електричних, магнітних і електромагнітних полів на людину є дуже динамічним і нормативні документи за рубежом часто переглядаються і змінюється їх правовий статус.

В основу нормування граничних напруженостей магнітних і електричних полів покладені науково обґрунтовані механізми впливу на організм людини: зміна різниці потенціалів на мембранах при частотах нижчих за 10 кГц і нагрів тканин при більш високих частотах. Базовими величинами є безпечні щільності струму в тканинах організму в діапазоні частот $4 \div 1000$ Гц – 10 мА/м^2 , а при частотах вищих за 10 кГц – питома енергія $\sim 4 \text{ Вт/кг}$.

При частоті 50 Гц такій щільності відповідають напруженості зовнішніх полів – 20 кВ/м і 4 кА/м.

При нормуванні допустимій напруженості полів і тривалості їх дії на робочих місцях і для населення, введені відповідні коефіцієнти запасу. Зокрема, при тепловому впливі ВЧ полів норми встановлюють по питомій енергії в 10 разів меншої за безпечну ($\sim 0,4 \text{ Вт/кг}$).

При низьких частотах також встановлюють коефіцієнти запасу: від 2,5 до 10 і вище. Гігієнічні норми всередині будівлі складають $\sim 0,5 \text{ кВ/м}$; при цьому напруженість електричного поля на границі відчуження ліній електропередачі не повинна перевищувати 1 кВ/м.

Міжнародні організації: всесвітня організація охорони здоров'я (ВОЗ); Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК); Міжнародна асоціація по захисту від іонізуючого випромінювання (IRPA); Європейський комітет по нормуванню в галузі електротехніки (CENELEC); Комісії європейського

союзу (CEU); національні комісії – займаються питаннями нормування діючих на персонал і населення електричних, магнітних і електромагнітних полів.

Згідно результатів численних досліджень, вплив полів на людину вважають *безпечним* при щільності струму в організмі $\sim 10 \text{ мА/м}^2$, що відповідає (при частоті 50 Гц) напруженості зовнішніх полів 20 кВ/м і 4 кА/м.

При щільності струму $100 \div 1000 \text{ мА/м}^2$ можливе сильне збудження клітин і тканин, порушення іонної рівноваги, процесів обміну в клітинах, центральній нервовій системі, виникнення больових відчуттів, а при великій щільності струму – можлива аритмія і навіть фібриляція серця.

Щільність струму $\sim 10 \text{ мА/м}^2$ в тілі людини вважається рівнем природних біострумів, при яких усі клітини нормально функціонують. Частоти біострумів знаходяться в діапазоні $4 \div 1000 \text{ Гц}$.

Ефективним методом діагностики стану організму людини є реєстрація сигналів, обумовлених біострумами – електрокардіограми, енцефалограми.

Більш зручним для контролю є вимірювання не щільності струму, а струму, що протікає через тіло людини в напрямку рука-рука.

Згідно ГОСТ 12.1.038, безпечний струм залежить від тривалості його дії (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Гранично допустимі струми через тіло людини

Умови	Час протікання струму, с											
	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	∞
Виробничі	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Побутові	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

За допомогою цих нормованих струмів можна визначити величину зовнішніх полів, які створюють такі струми. При тривалості протікання струму більш за 1с отримуємо величину таких полів – 25 кВ/м і 4 кА/м.

При скороченні часу дії, гранично допустимі напруженості полів зростають приблизно на 2 порядку.

При цьому напруженість електричного поля стає вищою за напруженість, при якій відбувається електричний поверхневий пробій вздовж тіла людини.

Науково встановлено два механізму впливу електричних і магнітних полів на людину за рахунок індукованих в тілі струмів:

- зміна різниці потенціалів між зовнішніми і внутрішніми поверхнями мембран клітин (виникнення так званого потенціалу дії);
- нагрів тканин.

Крім указаних раніше в розділі 6.3, існують більш слабкі ефекти впливу електричних і магнітних полів на організм, обумовлені зміною потенціалу дії, які виникають при меншій (на декілька порядків)

напруженості полів. Одним з таких ефектів є відчуття людиною поля не тільки по побічним ознакам (ворушіння волосся на голові, поколювання при часткових розрядах), але й підсвідоме відчуття поля, а також поява магніто- і електрофосфенів (відчуття мерехтіння на периферійних ділянках поля зору).

Чутливість полів людиною виключно індивідуальна. Приблизно 5% людей відчують наявність електричного поля промислової частоти, починаючи з напруженості ~ 7 кВ/м, а 60% – не відчують поле напруженістю до 20 кВ/м. Усереднені границі чутливості до електричних і магнітних полів, залежно від їх частоти наведені на рисунку 6.2. Порушення зору, недомагання, головні болі спостерігаються при напруженості порядку 10^5 А/м.

В США нормовані напруженості електричного поля на границі зони відчуження знаходяться в межах від 1 кВ/м до 3 кВ/м для різних штатів.

В деяких державах (Австралія) в виключних випадках для ліній 500 кВ допускається напруженість на границі зони відчуження ~ 5 кВ/м.

Аналогічна ситуація з нормуванням допустимій напруженості магнітного поля промислової частоти на робочих місцях і для населення. Рекомендації і норми різних міжнародних організацій і держав не погоджені між собою і можуть відрізнятись в декілька разів. А в деяких державах (в тому числі Росії) норми на допустимі напруженості магнітного поля промислової частоти для населення – взагалі відсутні!

Найбільш обґрунтованими і повними є тимчасові норми ENV50166, запропоновані Технічним комітетом CENELEC, які діють з 1995 р.

За базисну величину напруженості електричного поля при тривалій дії прийняті:

- постійне поле ~ 42 кВ/м;
- змінне поле з частотою $(0,1 \div 4)$ Гц ~ 30 кВ/м (критерій – відчуття по побічним ознакам).

В діапазоні частот $4 \div 1000$ Гц базисною величиною прийнята щільність струму в 10 мА/м², чому відповідають напруженості 20 кВ/м і 4 кА/м.

Враховуючи механізми зміни різниці потенціалів на мембранах клітин при більш низьких частотах, базова щільність струму береться зворотно пропорційною, а при більш високих, – прямо пропорційною частоті.

Базисною величиною напруженості постійного магнітного поля прийнята величина $\sim 1,6$ МА/м. Нормований струм, що протікає через людину при контакті з об'єктом, що знаходиться в електричному полі промислової частоти дорівнює 3,5 мА – на робочих місцях і 1,5 мА – для населення.

Норми напруженості полів промислової частоти на робочих місцях поділяються на три категорії.

Перша категорія – 6,1 кВ/м і 159 А/м: – обов'язкова інформація персоналу про поле.

Друга категорія – 12,3 кВ/м і 320 А/м і вище – обов'язкові заходи про обмеження часу перебування в полі.

Третя категорія – 19,6 кВ/м і 480 А/м – обов’язкове (крім обмеження перебуванні в полі) попередження: **«небезпечна робота»!**

Для населення базисні значення встановлені в 2,5 рази нижчими, ніж на робочих місцях. Існує тенденція послаблення обмежень по напруженості при нормуванні, якщо буде доведено, що небезпека шкідливого впливу поля на людину перебільшена.

Згідно СанПіН 2.2.4.11910S, встановлені гранично допустимі рівні постійного магнітного поля:

- за робочий день до 10 хв – 24 кА/м;
- при тривалості впливу 11÷ 60 хв – 16 кА/м;
- при тривалості 61÷ 480 хв – 8 кА/м.

Рівень допустимої локальної дії поля підвищується в 1,5 рази.

Напруженість електричного поля частотою 50 Гц на протязі робочої зміни може складати ~ 5 кВ/м. При скороченні терміну дії гранична напруженість збільшується до 20 кВ/м.

При напруженості $20 \div 25$ кВ/м допустимий термін перебування людини в полі складає 10 хв., а при напруженості вищу за 25 кВ/м, знаходження людини без засобів захисту взагалі не допускається !

Гранично допустимі рівні напруженості магнітного поля промислової частоти, діючого на все тіло людини:

- при терміні перебування до 1 години за зміну – 1600 А/м;
- до 2-х годин – 800 А/м;
- до 4-х годин – 400 А/м;
- до 8 годин – 80 А/м.

При локальній дії (наприклад, на кінцівки) гранично допустимі напруженості збільшуються в 4÷10 разів – в залежності від терміну перебування в полі.

Імпульсні поля промислової частоти можуть мати напруженість в залежності від режиму генерації і терміну дії – від 6000 А/м до 1400 А/м, тобто значно більшу, ніж при безперервній дії.

В СанПіН 2.2.4.1191-03 нормовані допустимі напруженості, потоки потужності, експозиції ВЧ електромагнітних полів.

6.5 Нормування умов роботи персоналу в зоні впливу ПС

Для персоналу ПС і ліній НВН, що тривалий час перебуває під впливом електричного поля, граничні напруженості поля не повинні перевищувати значень, наведених в таблиці 6.2. Ці дані дійсні, якщо весь інший час людина знаходиться в місцях з напруженістю електричного поля меншу за 5 кВ/м і виключена можливість дії електричних розрядів.

Напруженість поля визначається на рівні голови людини (1,8 м над рівнем землі). При виконанні цих умов, забезпечується поновлення фізіологічного стану організму на протязі доби без остаточних функціональних і патологічних змін. При невиконання умов таблиці 6.2

застосовують заходи по екрануванню робочих місць (тросові екрани над дорогами, екрануючі козирки і навіси над шафами управління, вертикальні екрани між фазами і т. п.).

Таблиця 6.2 – Допустима тривалість роботи персоналу в електричному полі промислової частоти

Напруженість електричного поля кВ/м	Допустима тривалість перебування персоналу на протязі доби, хв.
5	Без обмеження (на протязі робочого дня)
10	180
15	80
20÷25	10

Для ВРП ПС НВН одночасно із розрахунками, після її вводу в дію, здійснюють вимір напруженості поля в різних точках, після чого визначаються про необхідність екранного захисту. При ремонтних роботах застосовують з'ємні екрани.

Для ліній НВН, поблизу яких можливо знаходження персоналу сторонніх організацій і місцевого населення, встановлені наступні нормативи по допустимій напруженості під лінією без визначення допустимій тривалості перебування:

- 20 кВ/м – для труднодоступній місцевості (болота, горні схили);
- 15 кВ/м – для ненаселеної місцевості;
- 10 кВ/м – для перетинання з дорогами;
- 5 кВ/м – для населеної місцевості.

Крім того, нормується допустима напруженість на границях житлових будівель $\sim 0,5$ кВ/м, що допускає перебування людини в електричному полі необмежений час на протязі усього життя.

Якщо згідно розрахунків, при відстані проводів до землі, яке визначається перенапруженням, напруженості під лініями 330 кВ не перевищують 8,5 кВ/м, а під лініями 500 кВ – 14 кВ/м і не виникають утруднення при їх спорудженні в ненаселеній місцевості, то для ліній більш високого класу напруг, відстань до землі в тій же місцевості визначається допустимою напруженістю ~ 5 кВ/м.

Напруженість поля має найбільшу величину під лінією і по мірі віддалення від неї – швидко зменшується. Зона найбільшого впливу поля проводів знаходиться всередині прольоту, завдяки провисанню проводів, а найменшого – біля опор, де висота підвісу проводів найбільша. Саме тому дороги, пішохідні доріжки, лінії зв'язку і лінії більш низької напруги рекомендується розмішувати поблизу опор.

В охоронній зоні лінії не дозволяється розміщати постійних і тимчасових житлових і промислових споруд, та регламентується режим роботи персоналу.

Границі зони відчуження паралельні лінії і всередині неї напруженість поля перевищує 1 кВ/м; для ліній 500 кВ – це 25 м; а для 750 кВ – 40 м від крайніх фаз. Якщо при пересіченні лінією дороги необхідно знизити напруженість, то лінія екранується тросовими екранами у вигляді одного або двох тросів над кожною фазою, які підвішують на залізобетонних опорах і заземлюють на кінцях.

Тросові екрани застосовують і для зниження напруженості електричного поля на границях житлових будівель (біля стін житлових споруд).

Напруженості поля під лінією при нинішніх відстанях проводів до землі для ліній НВН значно перевищують допустимі для населення ~ 5 кВ/м. Згідно сучасних вимог відстань від проводів до землі для ЛЕП 330 кВ повинна бути не менш 12 м; для ЛЕП 500 кВ – 16,5 м; для ЛЕП 750 – 22 м.

Враховуючи наявність на шинах станцій і виводах ліній більш низьких напруг, економічніше виконувати такі виводи у вигляді комбінованих ліній, у яких під проводом більш високої напруги розташований провід низької напруги із зсувом системи напруг ланцюгів на 120° за рахунок зміни фази нижнього ланцюга (наприклад, 330/110, 500/220, 750/330). Можливе використання ліній з сильним зближенням фаз, екранування ліній, тощо.

В густонаселеній місцевості такі рішення можуть бути прийняті для всієї ЛЕП НВН, оскільки вони не тільки знижують напруженість поля, але підвищують її пропускну спроможність

Вторинним фактором, що суттєво впливає на роботу в охоронній зоні, є струм, що стікає з провідного, але ізольованого об'єкта при доторканні до нього. Величина цього струму визначається напругою лінії, ємністю об'єкту відносно лінії, яка визначається об'ємними параметрами об'єкта і активним опором людини. Його можна розрахувати за виразом

$$I_{np} = K_{\phi} \cdot V \cdot E, \quad (6.7)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнти форми об'єкту; V – об'єм об'єкту; E – напруженість електричного поля на рівні 1,8 м над землею.

Таким чином, стікаючий струм пропорційний напруженості поля і об'єму об'єкта. Наприклад, при напруженості поля 15 кВ/м комбайн СК-4 з причепом дає стікаючий струм ~ $6 \div 6,5$ мА, великі автобуси ~ $5 \div 6$ мА, тобто вони можуть бути небезпечні для жінок і дітей.

Згідно даним американських вчених, безпечним для чоловіків є струм 9 мА, для жінок – 6,5 мА, для дітей – 4,5 мА (згідно ENV50166 встановлені більш жорсткі норми: 3,5 мА – на робочих місцях і 1,5 мА – для населення).

Ці норми регламентують умови труда і знаходження місцевого населення в охоронній зоні лінії 750 кВ і вище, зокрема, усі сільськогосподарчі машини і механізми повинні бути обладнані двома заземлюючими ланцюгами з заглиблюваними заземлювачами.

Ефективним засобом обмеження напруженості поля під повітряними ЛЕП є рослинні масиви. В зоні суцільних рослинних масивів висотою 3÷4м

(фруктові сади) при відстані між деревами $6 \div 8$ м, напруженість поля в міжряддях знижується в $2 \div 3$ рази порівняно з проходженням лінії в польових умовах.

6.6 Екологічний вплив коронного розряду

Коронний розряд на проводах ЛЕП створює перешкоди радіо- і телевізійному прийому а також акустичний шум. Причиною цього є стримерна корона на проводах, яка виникає переважно при атмосферних опадах, коли знижується початкова напруженість виникнення коронного розряду. В хорошу погоду перешкоди зростають при забрудненні проводів.

Радіоперешкоди. Спектр частот випромінювання, створюваних стримерною короною охоплює діапазон частот від 10 кГц до 1 ГГц. Перешкоди на частотах, вищих за 30 МГц, впливають на телеприйм і виникають тільки при коронуванні ЛЕП 750 кВ. В цьому випадку джерелом перешкод є також часткові розряди в зазорах і тріщинах ізоляторів і корона на загострених частинах арматури.

Інтенсивність радіоперешкод характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля поблизу поверхні землі (E_2).

Рівень радіоперешкод, дБ визначається величиною

$$Y = 10 \lg(E_2/E_1) = 20 \lg(E_2/E_1), \quad (6.8)$$

де E_1 – базова напруженість електричного поля, мкВ/м.

За базову напруженість приймають $E_1 = 1$ мкВ/м, тоді рівень радіоперешкод

$$Y = 20 \lg E \quad (6.9)$$

В якості розрахункової частоти згідно рекомендації Міжнародного комітету по радіоперешкодам прийнято $f = 0,5$ МГц. Рівень корисного сигналу при такій частоті складає приблизно ~ 60 дБ. Радіоприйом вважається задовільним, якщо корисний сигнал перевищує перешкоди на 20 дБ. Тому допустимий рівень перешкод в хорошу погоду складає ~ 40 дБ, що відповідає напруженості поля $E = 100$ мкВ/м. Така величина напруженості електричного поля радіоперешкод прийнята в якості допустимого на відстані 100 м від проекції на землю крайнього проводу ЛЕП напругою 330 кВ і вище. З віддаленням від лінії рівень перешкод знижується згідно залежності

$$Y_2 - Y_1 = 20 k \cdot \lg l_1 / l_2, \quad (6.10)$$

де Y_2, Y_1 – рівні радіоперешкод на відстані l_1, l_2 , відповідно; k – коефіцієнт затухання, рівний 1,6 – в діапазоні частот $0,15 \div 1$ МГц.

Залежність між рівнем радіоперешкод і напруженістю електричного поля на поверхні проводів лінійна і розраховується за емпіричною формулою

$$Y_2 - Y_1 = k_1 \cdot l \cdot (E_{np2} - E_{np1}), \quad (6.11)$$

де E_{np2} , E_{np1} – напруженості на проводах, кВ/см; k_1 – коефіцієнт, рівний 1,8 – при напруженості поля $\sim 20 \div 30$ кВ/см.

Збільшення радіуса проводів при незмінній напруженості на них призводить до збільшення рівня радіоперешкод, оскільки спад напруженості поля біля проводу в радіальному напрямку при цьому сповільнюється і створюються умови для розвитку більш інтенсивної стримерної корони. Зв'язок між рівнями радіоперешкод і радіусами проводів встановлюється за імпиричної формулою

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg(r_2/r_1), \quad (6.12)$$

де r_2 , r_1 – радіуси проводів.

Радіоперешкоди практично не залежать від числа складових проводів розщепленої фази, оскільки відбувається взаємне електромагнітне екранування проводів фаз.

Якщо відомий рівень радіоперешкод Y_1 на нормованій відстані від лінії і параметри E_1 і r_1 ретельно досліджені на базовій лінії електропередачі, то рівень радіоперешкод при хорошій погоді Y_2 , створеною іншою лінією с параметрами E_2 і r_2 , може бути розрахований за узагальненій формулі

$$Y_2 = Y_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg(r_2/r_1). \quad (6.13)$$

Акустичний шум. Акустичний шум виникає переважно в погану погоду, коли посилюється інтенсивність коронування проводів: шипіння, що відповідає частоті 100 Гц і кратним їй частотам; та широкосмуговий шум.

Перша складова обумовлена рухом об'ємного заряду біля проводів, що двічі за період створює хвилі звукового тиску.

Друга генерується стримерною короною.

Рівні гучності шумів в дБ (А) вимірюються із застосуванням корегуючи фільтрів типу А, які дають змогу врахувати фізіологічні особливості органів слуху людини.

Особливо інтенсивний шум від корони виникає при сильному дощі, але сам дощ створює шум, який перевищує акустичний. Тому більш суттєві перешкоди при мрячному дощу, тумані, при мокрих проводах.

Рівень гучності в цьому випадку на 5 ÷ 6 дБ (А) нижчий, але значно перевищує загальний звуковий фон.

Оцінка акустичного шуму здійснюється за умов «вологих проводів».

Гучність при дощі розраховується за емпіричною формулою

$$A = 16 + 1,14 E_{max} + 9 r + 15 \lg n - 10 \lg l, \quad (6.14)$$

де A – рівень гучності, дБ(А); r – радіус проводу, см; E_{max} – максимальна напруженість на поверхні проводів, кВ; n – число проводів в розщепленій фазі; l – відстань від крайній фази, м.

Для чистих районів допустимі напруженості на поверхні проводів ВЛ визначаються акустичними перешкодами при діаметрі проводів $d > 3,26$ см.

В районах з промисловим забрудненням допустимі напруженості визначаються радіоперешкодами при $d = 2,7 \div 3,3$ см і акустичним шумом при $d > 3,3$ см.

Для вирішення проблеми електромагнітної сумісності ліній електропередачі радіоприймальних систем різноманітного призначення з метою їх нормального функціонування, важливим завданням є визначення реального рівня напруженості поля перешкод, створюваних ПЛ. Причиною перешкод від ЛЕП може бути: корона на проводах; часткові розряди; корона на ізоляторах; пробій або перекриття дефектних ізоляторів; корона на лінійній арматурі і розпірках проводів розщепленої фази; іскрінням між елементами лінійної арматури та ін.

Зниженню радіоперешкод від ПЛ і покращенню електромагнітної обстановки вздовж трас сприяє нормування рівня радіоперешкод. Ці норми створюють юридичну основу відношень між проектувальниками і власниками радіоприймальних засобів.

У більшості держав встановлені національні норми на величини напруженості поля перешкод, створюваних повітряними лініями електропередач і високовольтним обладнанням (табл. 6.4). Для порівняння вимог національних норм допустимі рівні радіоперешкод були перераховані на відстань 100 метрів від ПЛ і на частоту 0,5 МГц, рекомендовані СИСПР (міжнародний спеціальний комітет по перешкодам) в якості базисної при розрахунках.

Таблиця 6.4 – Норми різних країн на радіоперешкоди від ПЛ

№ з/п	Держава	Частота виміру	Місце виміру	Погодні умови 80% часу	Норми, дБ	Допустимі рівні радіоперешкод на відстані 100 м від проекції крайній фази на землю	
						Хороша погода	50 % часу
1	РФ	0,5 МГц	Відстань від крайній фази	80	43	37	43
2	США	1 МГц	Відстань від проекції крайній фази	80	52	27,3	33,6
3	Японія	1 МГц	Під лінією	50, дождь	53	24,9	30,9
4	Індія	0,5 МГц	На границі зони відчуження	Хороша погода	46	24,7	30,7
5	Польща	0,5 МГц	Відстань від проекції крайній фази на землю	50 Хороша погода	46	27,6	33,6

Для оцінки негативного впливу ПЛ на радіоприйом необхідно використовувати не тільки абсолютні значення напруженості поля перешкод,

але і величину відношення сигнал/перешкода, тобто відношення напруженості поля корисного сигналу і напруженості поля перешкод, виміряних в одному місці.

Одна і та ж лінія електропередачі може бути джерелом значних перешкод для районів з низьким рівнем корисного сигналу і малих перешкод в зонах з високим рівнем сигналу. Початковою величиною при розробці норм на радіоперешкоди є гарантований рівень захищеного корисного сигналу. У відповідності до міжнародної практики за мінімальну напруженість поля радіосигналу, яку необхідно захищати від перешкод на частоті 1 МГц, прийнятий рівень 60 дБ, а на частоті 0,5 МГц – 66 дБ. Взаємозв'язок між відношенням сигнал/перешкода і якістю прийому встановлюється на практиці (експериментально).

Електромагнітні поля радіочастотного діапазону. Поля радіочастотного діапазону вимірюють у місцях розташування пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління в діапазоні частот $1 \div 1000$ МГц.

Вимірюють також напруженості електромагнітного поля від переносних і стаціонарних радіопередавальних станцій, вимірюючи залежність напруженості поля від відстані до джерела електромагнітного випромінювання і послаблення поля штучними перепонами (екранами, стінами, корпусами пристроїв).

Для вимірювання перешкод в радіочастотному діапазоні використовують селективні ВЧ вольтметри з набором антен. Для сигналів вертикальної поляризації в діапазоні $26 \div 300$ МГц використовують біконічні антени з круговою діаграмою направленості і вхідним опором 50 Ом.

Для сигналів з горизонтальною поляризацією використовують дипольні антени з вхідним опором 50 Ом.

Важливим є узгодження антенно-фідерного тракту з вольтметром у всьому діапазоні частот. При цьому, величина коефіцієнта стоячої хвилі напруги не повинна перевищувати 3.

Для проведення вимірювань в діапазоні $300 \div 1000$ МГц можна використовувати калібровану вимірювальну антену, або рупорну вимірювальну антену П-6-33 з вхідним опором 50 Ом. Вона приймає сигнали будь якої лінійної поляризації і має діаграму направленості $\pm 45^\circ$.

Для сигналів з горизонтальною поляризацією можливо використовувати калібровану широкосмгову антену у вигляді конічного диполя ДП-3 із вимірювального комплексу FSM-8,5 з вхідним опором 50 Ом і коефіцієнтом стоячої хвилі не більш, ніж 2. Магнітний компонент поля розраховують за формулою

$$H, \text{ дБ(мкА/м)} = E, \text{ дБ(мкВ/м)} - 52. \quad (6.15)$$

Застосування спектроаналізатора дає змогу здійснити графічне представлення параметрів частотного спектра перешкод у всьому діапазоні.

Для спрощеного стандартизованого представлення електромагнітної обстановки введені типові класи навколишнього середовища.

Клас 1 – дуже низький рівень полів (приклад: приміщення для ПК):

- лінії сильного струму і управління прокладені окремо від установок
- більш високого класу;
- лінії живлення на обох кінцях мають заземлені екрани і мережні фільтри;
- комутаційні перенапруження в ланцюгах управління «придушені» відповідними ланцюгами;
- наявність люмінесцентних ламп.

Клас 2 (низький рівень полів) (Контрольно-вимірювальні щити на станціях):

- наявність люмінесцентних ламп;
- комутаційні перенапруження при вимиканнях реле частково обмежені, контактори відсутні;
- лінії сильного струму і управління прокладені окремо від установок більш високого класу;
- роздільна прокладка неекраниваних ліній живлення і ліній управління.

Клас 3 (рівень промислових полів) (Щити управління електростанцій):

- релейні котушки не мають обмежувачів ланцюгів, немає контакторів;
- лінії живлення прокладені окремо від ліній управління, сигнальних і телефонних;
- не обов'язкове розділення ліній сильного струму і управління від елементів установки з більш високим рівнем перешкод;
- не обов'язкове розділення ліній управління, сигнальних і телефонних одне від одної;
- можливе використання загальної системи заземлення.

Клас 4 (високий рівень промислових полів) (Установки відкритого типу електростанцій і пристрої керування технологічними процесами):

- реле і контактори, які не мають обмежувальних ланцюгів;
- сумісне прокладання ліній управління, сигналізації та телефонних;
- використання багатожильних кабелів для ліній управління і сигнальних;
- не обов'язкове відділення проводів від часток установки з різним рівнем перешкод.

Клас X (екстремальний рівень полів). Розташування приладів в безпосередній близькості до джерела екстремальних перешкод. Споживачем повинні запроваджуватись додаткові заходи для зменшення рівня перешкод.

Кожен клас середовища визначає норми контролю: – амплітуди випробувальних напруг і струмів, які, наприклад, повинні в 2 рази

(або на 6 дБ) перевищувати рівень перешкод, характерних для відповідних класів.

По результатам проведених вимірювань та розрахунків складають Протоколи на відповідність електромагнітної обстановки безпечним умовам роботи (дод. Б, В).

7 МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

7.1 Способи обмеження рівня гармонік напруг і струмів

При необхідності зниження інтенсивності випромінювання полів використовують пасивні пристрої придушення, до яких відносять фільтри, обмежувачі перенапруг і екрани, які в залежності від конкретної задачі, встановлюють біля чутливого елемента або у джерела (рис. 7.1). Захисна дія цих пристроїв визначається відношенням інтенсивності поля до і після захисного елемента Z/Z_r .

В електричних системах для зменшення амплітуди струмів і напруг однієї або декілька фіксованих частот застосовують паралельні фільтри які складається із паралельно з'єднаних конденсатора і котушки індуктивності.

Для запобігання проникненню струмів конкретної частоти в окремі вузли перетворювальної підстанції або частини енергетичної системи, використовують послідовний фільтр, який складається із послідовно з'єднаних конденсатора і котушки індуктивності, які створюють великий опір протіканню струму на даній частоті.

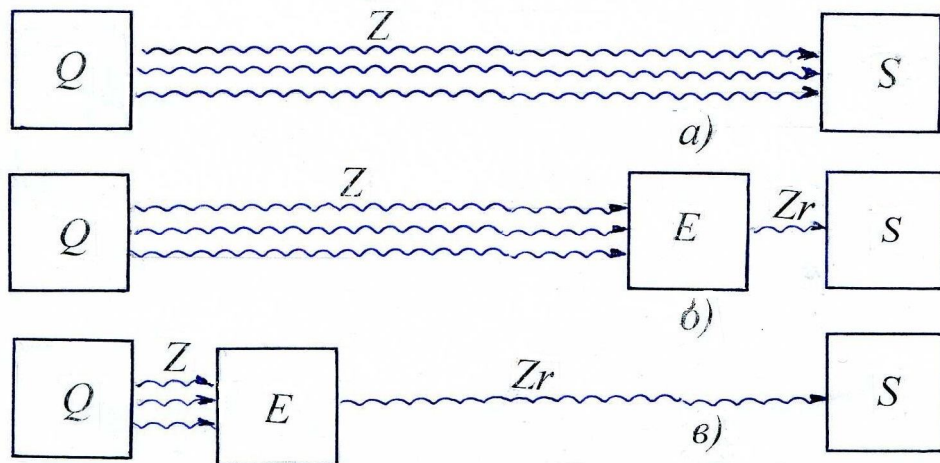


Рисунок 7.1 – Варіанти розташування джерела полів Q відносно приймача S і захисного елемента E :
а) – захист відсутній; б) – захист приймача;
в) – придушення завад біля приймача

Але для обмеження напруг гармонік самого джерела такий спосіб не використовують, оскільки генерація гармонік нелінійними елементами

підстанції (трансформатор, статичні перетворювачі) є нормальним режимом їх роботи. В самих статичних перетворювачах задача запобігання проникненню гармонік струму в систему, вирішена шляхом створення короткозамкненого шляху з малим опором для гармонічних частот.

7.2 Фільтри

Фільтри використовують для забезпечення затухання перешкод, які розповсюджуються по проводам. Ефективність їх застосування може бути досягнута при умові суттєвої різниці спектрів корисного сигналу і перешкоди. Це дає змогу здійснювати селективне демпфірування перешкоди при відсутності впливу його на корисний сигнал (рис. 7.2).

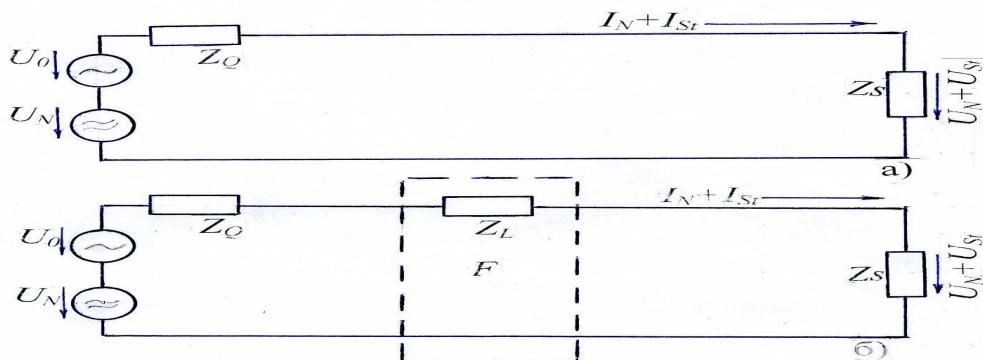


Рисунок 7.2 – Схема без фільтра – (а) і з фільтром – (б)

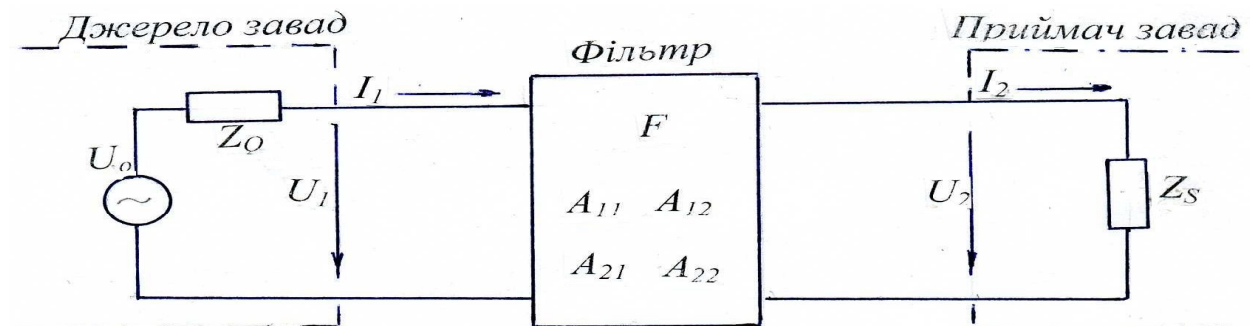


Рисунок 7.3 – Контур з фільтром

Якщо в низькочастотний контур корисного сигналу (U_N , I_N) прямує високочастотний сигнал перешкоди (U_o), то на повному опорі приймача Z_s з'являється напруга перешкоди

$$U_{zt} = U_o \frac{Z_s}{Z_o + Z_s}. \quad (7.1)$$

При застосуванні подовжнього повного опору Z_L (рис. 7.2, б) формі (ωL), яке для низькочастотного струму I_t дуже мале, а для високочастотного I_t – дуже велике – забезпечується послаблення перешкоди і

напруга перешкоди знижується до величини

$$U_{3t} = U_o \frac{Z_3}{Z_Q + Z_L + Z_3} \quad (7.2)$$

Величину затухання визначають коефіцієнтом затухання – це відношення падінні напруги на Z_3 при наявності Z_L – і без нього

$$\left| \frac{U_{3t}}{U_{3t}^*} \right| = \left| \frac{Z_Q + Z_L + Z_3}{Z_Q + Z_3} \right| \quad (7.3)$$

Коефіцієнт затухання записується як логарифм відношення напруг і вимірюється в децибелах

$$a_3 = 20 \lg \left| \frac{U_{3t}}{U_{3t}^*} \right| \quad (7.4)$$

Згідно (7.3.) ефект затухання залежить як від Z_L , так і від повного опору Z_Q і Z_3 .

Взагалі фільтр F – це чотирьохполюсник, який об'єднує джерело перешкод і приймач, тому для його розрахунку застосовують наступні співвідношення:

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{11} \dot{U}_2 + \dot{A}_{12} \dot{I}_2 \quad (7.5)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{A}_{21} \dot{U}_2 + \dot{A}_{22} \dot{I}_2. \quad (7.6)$$

Тут $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ – комплексні параметри чотирьохполюсника, величини для яких наведені в таблиці 7.1.

Із рисунка 7.3 запишемо:

$$\dot{U}_o = \dot{U}_1 + Z_Q \dot{I}_1, \quad (7.7)$$

$$\dot{U}_2 = Z_3 \dot{I}_2, \quad (7.8)$$

то напруга на вході приймача без фільтра дорівнює

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_o \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3}. \quad (7.9)$$

Послаблення сигналу в фільтрі визначають як логарифм відношення напруг на вході приймача без фільтра – \dot{U}_{20} , і з фільтром – \dot{U}_2 .

Коефіцієнт затухання в фільтрі будь-якої структури згідно (7.5)÷(7.9) дорівнює

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{11} + \frac{1}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{12} + \frac{\dot{Z}_Q \dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{21} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{22} \right|. \quad (7.10)$$

Звідси витікає, що коефіцієнт затухання залежить як від параметрів $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$, так і від повних опорів джерела та приймача завад і може сильно відрізнятись в залежності від конкретних умов. Тому паспортні дані про коефіцієнт затухання $a_e(f)$ можна використовувати лише для конкретних умов як показник його якості. Зокрема, при $\dot{Z}_Q = \dot{Z}_3 = 50 \text{ Ом}$, згідно (7.4)

$$a_3 = 20 \lg U_o / 2U_2, \text{ дБ, (оскільки } U_{20} = U_o / 2). \quad (7.11)$$

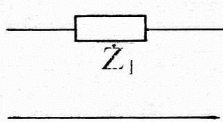
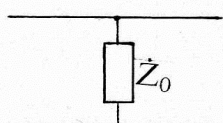
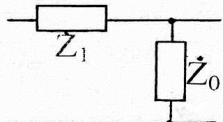
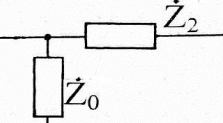
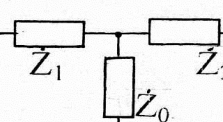
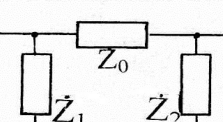
В інших випадках фактичну ефективність фільтра визначають експериментально, або розрахунком згідно (7.5), якщо відоме співвідношення повних опорів $\dot{Z}_0 i \dot{Z}_3$. В таблиці 7.1 наведені значення коефіцієнтів A для різних типів фільтрів.

Якщо параметри \dot{Z}_0 та \dot{Z}_3 відомі приблизно, то вибір структури фільтра можна здійснити згідно таблиці 7.2.

Основними елементами фільтрів є котушки індуктивності і конденсатори, які використовуються як окремо, так і в комбінації. Зокрема, двохполюсні конденсатори, в залежності від способу приєднання їх в ланцюг струму (між прямими і зворотними проводами, між проводом і землею) придатні для захисту від синфазних і протифазних перешкод.

Конденсатори-вводи, що з'єднані з корпусом, захищають лише від синфазних завад. Конденсатори чотирьохполюсники – від протифазних завад, а багатосекційні – від обох видів перешкод.

Таблиця 7.1 – Параметри чотирьохполюсників простіших фільтрів

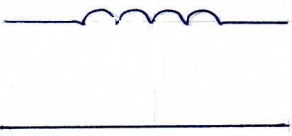
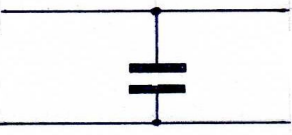
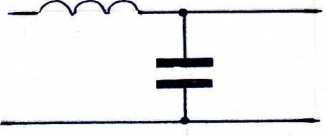
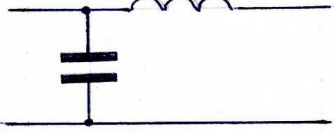
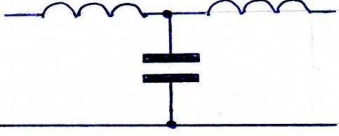
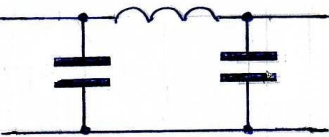
Схема	Коефіцієнт			
	\dot{A}_{11}	\dot{A}_{12}	\dot{A}_{21}	\dot{A}_{22}
	1	\dot{Z}_1	0	1
	1	0	$1/\dot{Z}_0$	1
	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 \dot{Z}_2$	$1/\dot{Z}_0$	1
	1	\dot{Z}_2	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0}$	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_2$	\dot{Z}_0	$1/\dot{Z}_1 + 1/\dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_1$

Захисні котушки індуктивності виконують з мінімальними ємністю і активним опором із замкненим або розімкненим сердечником. Котушки зі стрижнями або кільцевим сердечником демпфують як синфазні, так і протифазні перешкоди.

В електричних системах фільтри застосовують для зменшення амплітуди струмів і напруг однієї або декілька фіксованих частот (паралельні фільтри).

В самих статичних перетворювачах задача запобігання проникненню гармонік струму в систему, вирішена шляхом створення короткозамкненого шляху з малим опором для гармонічних частот.

Таблиця 7.2 – Рекомендації по вибору типу фільтра

Опір джерела	Схема фільтра	Опір приймача
Мале		Мале
Велике		Велике
Мале		Мале
Велике		Велике
Мале, невідоме		Мале, невідоме
Велике, невідоме		Велике, невідоме

Паралельний фільтр налаштований на задану частоту, якщо на цій частоті його індуктивний і ємнісний опір рівні.

Добротність фільтра Q визначає точність його настройки. Фільтр з високою добротністю (від 30 до 60) налаштовується строго на одну з гармонічних частот (наприклад, п'яту).

Фільтр з низькою добротністю ($Q \sim 5$) має низький опір в широкому діапазоні частот. Якщо такий фільтр використовують для придушення гармонік високих порядків (вище 17-й), то його можна приймати як фільтр верхніх частот.

На рисунку 7.3 і 7.4 наведені основні схеми фільтрів і залежності їх опору від частоти. Як видно з рисунка 7.3, б, полоса пропускання частот фільтра P обмежена частотою, на якій реактивний опір фільтра дорівнює його активному опору (тобто кут повного опору $= 45^\circ$) і частотою, на якій модуль повного опору дорівнює $\sqrt{2} R$.

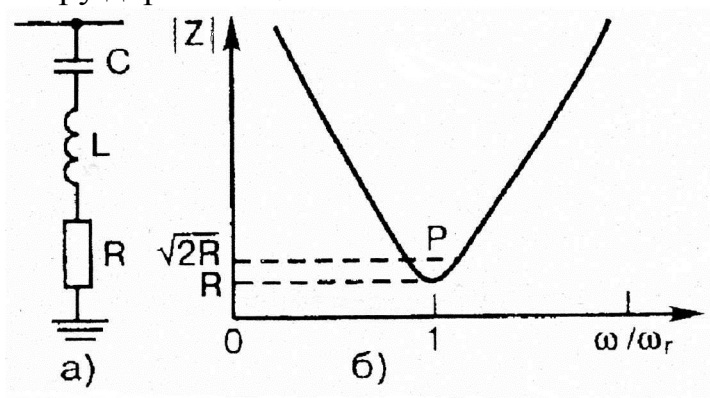


Рисунок 7.4 – Схема паралельного фільтра налаштованого на одну частоту – (а), і залежність його повного опору Z від частоти – (б)

Для налаштованого фільтра Q визначається як відношення індуктивного (або ємнісного) опору при резонансі, – до активного опору.

Добротність фільтра пов'язана з шириною його полоси пропускання згідно співвідношенню

$$Q = \omega_n / R, \quad (7.12)$$

де ω_n – налаштована кутова частота, рад/с.

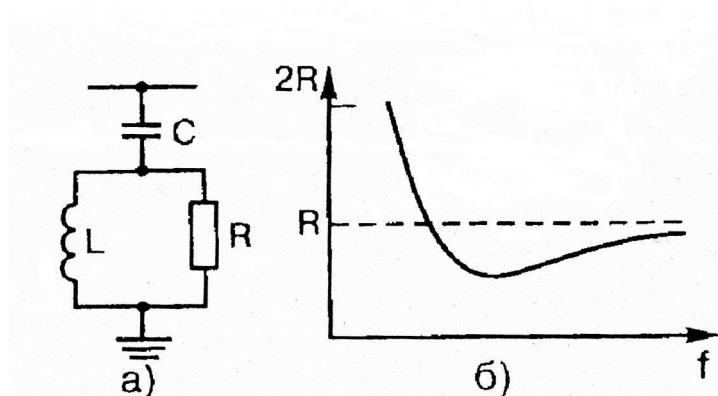


Рисунок 7.5 – Схема паралельного фільтра другого порядку придушення частот (а) і залежність його повного опору R від частоти f (б)

Точність настройки фільтра придушення високих частот зворотна добротності налаштованих фільтрів.

Ступень невідповідності настройки фільтра номінальній налаштованій частоті характеризується коефіцієнтом d , який враховує зміну основної (живлючої) частоти, зміну ємності і індуктивності фільтра, що пов'язано з старінням деталей фільтра і коливанням температури, а також технологічними відхиленнями при виготовленні.

Загальна розстройка фільтра на одиницю номінальної налаштованої частоти дорівнює

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (7.13)$$

Зміна L і C на 2% призводить до відповідної розстройки фільтра, як і зміна частоти на 1%. Тому δ можна визначити з такого виразу

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right). \quad (7.14)$$

Потужність фільтра визначається по реактивній потужності, що її генерує фільтр на основній частоті. Ця потужність майже дорівнює реактивній потужності основної частоти, що її генерують конденсатори. Сумарна потужність гілок фільтра визначається вимогами по реактивній потужності, які висуваються до джерела гармонік в мережі змінного струму.

Оптимальний критерій роботи фільтра, який полягає у придушенні усіх викривлень форми напруги – є нереальним як з технічної, так і економічної точок зору.

Більш реальний критерій пропонує зменшення викривлень до допустимого рівня в точці загального приєднання декількох споживачів і використовує або гармонічний струм, або напругу, або їх разом.

Критерій, заснований на гармоніках напруги, – більш зручний для розробки фільтрів, оскільки опір мережі змінного струму весь час змінюється, – тому простіше гарантувати роботу фільтра у певному діапазоні напруг, ніж величину робочого струму.

Для того, щоб врахувати необхідні гармонічні обмеження при розробці фільтрів необхідно:

- в мережу, яка містить фільтр, з'єднаний з електричною схемою змінного струму (рис. 7.6), ввести спектр гармонік струму, який генерується нелінійним навантаженням на відповідних частотах і розрахувати гармоніки напруги;

- результати використовувати для визначення таких характеристик, як викривлення напруги, коефіцієнта впливу на лінії зв'язку та ін.;

- розрахувати напругу на елементах фільтра (конденсаторах, котушках індуктивності, резисторах) та їх параметри і втрати енергії в них.

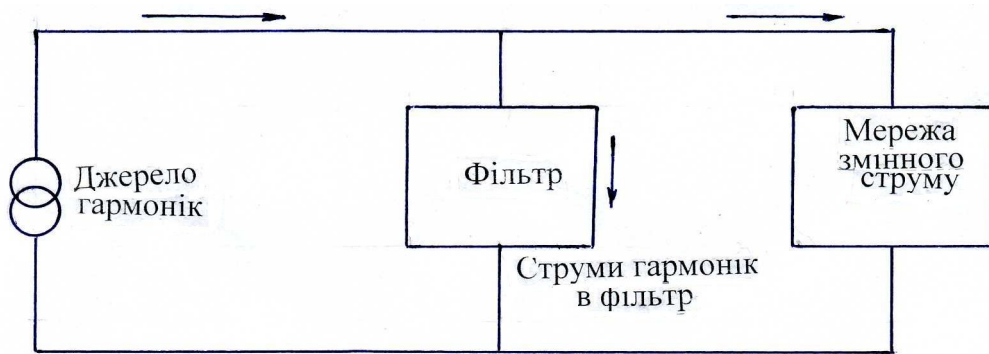


Рисунок 7.6 – Схема визначення коефіцієнта викривлення напруги

Головну увагу при розробці фільтрів необхідно приділити трьом елементам: джерелу струму, провідності фільтра і системи.

В залежності від навантаження, а для статичних перетворювачів, – і від кута запалення, буде змінюватися характеристика джерела струму.

Після визначення провідності фільтра і системи, розраховують для кожної частоти мінімальне значення загальної еквівалентної провідності, що дає максимальне викривлення напруги. Визначивши схему приєднання фільтра, можна побудувати геометричне місце точок, яке відповідає опору (провідності) фільтра.

Розроблений таким чином фільтр являє собою однополюсну схему, спроможну гасити весь спектр проходящих гармонік. Але необхідна для цього ємність дуже велика, тому економічніше задавлювати гармоніки малих порядків за допомогою одноплечового налаштованого фільтра.

Налаштовані фільтри. Фільтр однієї частоти являє собою послідовний *RLC*-ланцюжок (рис. 7.7, а), налаштований на частоту однієї гармоніки. Повний опір такого фільтра на резонансній частоті f_n зменшується до чисто активного опору R .

$$Z_{\phi} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}). \quad (7.15)$$

Фільтри подвійної настройки. Інколи замість двох одночастотних фільтрів (рис. 7.7, а) застосовують фільтр подвійної настройки (рис. 7.7, б). В діапазоні резонансних частот опори двох одночастотних фільтрів практично рівні опорам схеми фільтра, налаштованого на дві частоти. Перевагою цієї схеми порівняно з одно частотними схемами фільтрів є значне зниження втрат енергії на основній частоті. Основною перевагою фільтра, налаштованого на дві частоти, є більша робоча напруга, що дозволяє зменшити число котушок індуктивності, які знаходяться під повною лінійною напругою.

Можливо створення фільтра, налаштованого на більшу кількість частот, але потребує більш складного налаштування.

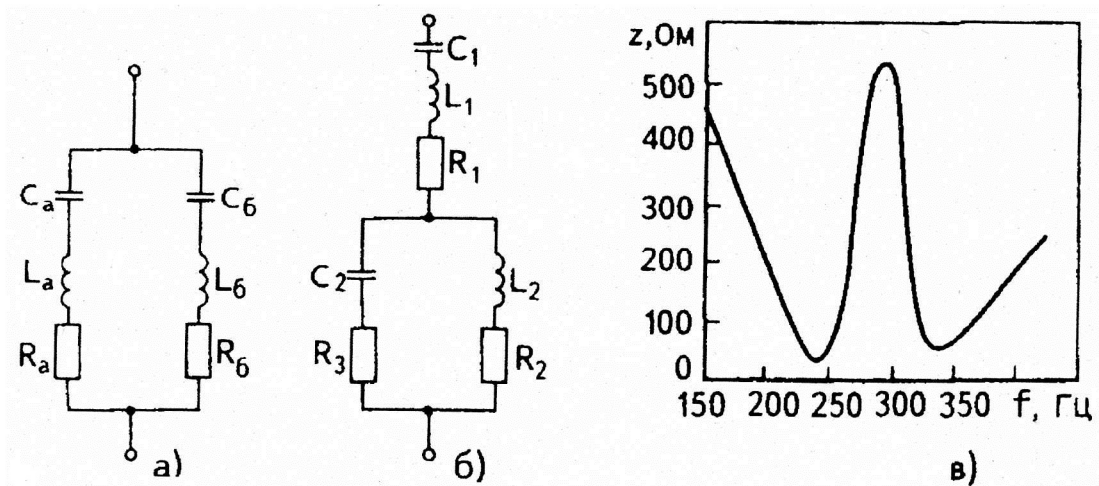


Рисунок 7.7 – Одночастотний фільтр – (а); фільтр подвійної настройки – (б);
і залежність опору від частоти фільтра 5-й та 7-ой гармонік – (в)

Фільтри з автоматичною настройкою. Важливою вимогою при розробці налаштованих фільтрів є зменшення максимального відхилення частоти. Цього отримують застосовуючи настройку фільтра за допомогою автоматичного регулювання ємності або зміною індуктивності в межах $\pm 5\%$.

В перетворювачах постійного струму використовують систему управління, яка вимірює реактивну потужність гармонічної частоти в фільтрі і змінює величину L або C в залежності від її знаку і величини.

Порівняно з фільтрами з фіксованою частотою, автоматично налаштовані фільтри:

- мають меншу ємність конденсаторів;
- за рахунок великої добротності втрати потужності в них – менші;
- конденсатори можуть мати велику реактивну потужність і великий температурний коефіцієнт ємності з розрахунку на одиницю маси і одиницю вартості.

Широкосмугові фільтри. Широкосмугові фільтри мають такі переваги:

- меншу чутливість до коливань температури, відхилення частоти, технологічним допускам при виготовленні, втратам в ємнісних елементах;
- малий опір широкому спектру гармонік, відсутність необхідності розбивки фільтра на паралельні гілки;
- зручність в обслуговуванні, якщо використання настроєних фільтрів призводить до виникнення резонансу.

Недоліками широкосмугових фільтрів є:

- необхідність розраховувати на більш високу потужність для отримання однакового рівня фільтрації;
- втрати енергії в резисторі і в котушці індуктивності значно вищі.

Типи широкосмугових фільтрів наведені на рисунку 7.8 – фільтри першого, другого, третього порядків і C -типу.

Фільтр першого порядку застосовують рідко, оскільки він потребує конденсатора великої потужності, а втрати на основній частоті – завеликі.

Фільтр другого порядку зручний в експлуатації, але втрати на основній частоті порівняно з третім порядком – більші.

Основною перевагою фільтра третього порядку є малі втрати енергії на основній частоті, пов'язані із збільшенням повного опору на цій частоті завдяки конденсатору C_2 . Ємність C_2 набагато менша за ємність C_1 .

Фільтр C -типа займає положення між фільтрами другого і третього порядку. Основною його перевагою є суттєво менші втрати на основній частоті завдяки тому, що C_2 і L на цій частоті послідовно налаштовані. Такі фільтри найбільш чутливі до зміни основної частоти і відхилення параметрів елементів схеми.

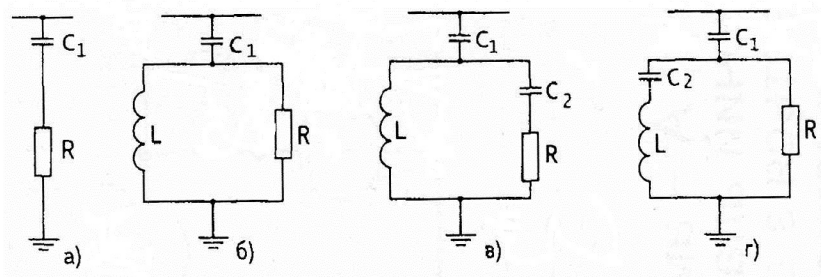


Рисунок 7.8 – Широкопasmові високочастотні фільтри:

а) – першого порядку; б) – другого порядку;
в) – третього порядку; г) – C -типа

Складні фільтри. Зазвичай потужні статичні перетворювачі розраховані на роботу з 12-пульсним циклом, але інколи за умов експлуатації допускається робота з 6-пульсним циклом. В цьому випадку перетворювач генерує додатково до канонічних гармонік 12-пульсного режиму гармоніки п'ятого і сьомого порядку. Ці гармоніки одфільтровуються спеціальною схемою, яка складається з настроєних фільтрів для гармонік малих порядків (5, 7, 11, і 13-го) і високочастотного гасячого фільтра для гармонік 17-го і більш високих порядків (рис. 7.9).

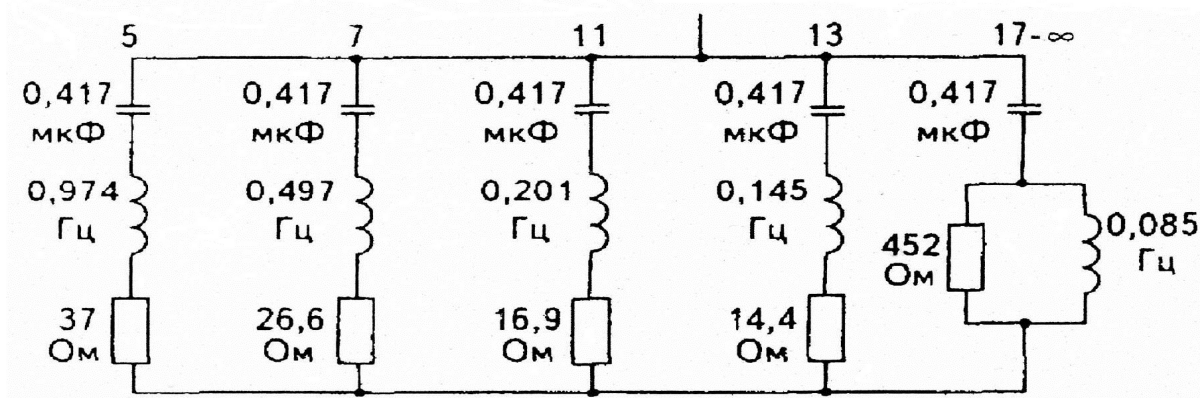


Рисунок 7.9 – Фільтр змінного струму

Смугова фільтрація для 12-пульсних перетворювачів.

Встановлення на підстанції налаштованих фільтрів резонансу напруг для 11-й і 13-й гармонік і високочастотних фільтрів для гармонік більш високих порядків, зазвичай призводить до надмірно сильного придушення гармонік. Це обумовлено тим, що мінімальна потужність фільтра визначається найменшою потужністю конденсаторів, яка допустима з економічних міркувань, та мінімальною реактивною потужністю, що генерує перетворювач.

Отже, схема фільтра може бути спрощена шляхом заміни налаштованих фільтрів 11-й та 13-й гармонік на один гасящий фільтр, або заміною на такий фільтр – усіх фільтрів схеми.

В першому випадку гасящий фільтр, який замінює два налаштованих фільтра, налаштовують приблизно на 12-у гармоніку (при цьому його добротність буде достатньо великою ($20 \div 50$), в той час як добротність гасящого фільтра вищих гармонік значно менша ($2 \div 4$).

У другому випадку гасящий фільтр також налаштований на 12-у гармоніку, але для забезпечення достатньо низького опору для великих гармонік, добротність вибирають відносно малою ($2 \div 6$).

В сучасних потужних перетворювачах високої напруги значна імовірність резонансу гармонік малих порядків між повним опором системи і ємнісним опором фільтра. В залежності від виду джерела гармонік малих порядків (система змінного струму або перетворювач), може спостерігатися резонанс напруг і резонанс струмів.

Завдяки несиметрії системи, перетворювач генерує значну третю гармоніку струму. Вони мають пряму послідовність чередування фаз і тому не поглинаються обмоткою трансформатора, що з'єднана в трикутник.

Для запобігання появи резонансу на малих частотах пропонується інша схема фільтрації, що складається з фільтра С-типу і фільтра другого порядку. (рис. 7.9).

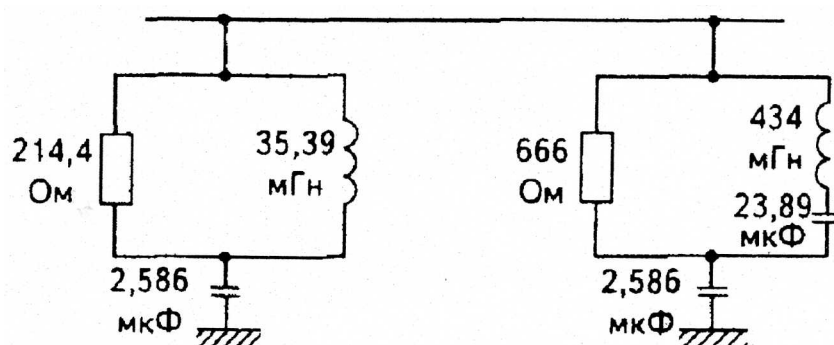


Рисунок 7.10 – Змішаний фільтр другого порядку і С-типу

Це обумовлено тим, що мінімальна потужність фільтра визначається найменшою ємністю конденсаторів, допустимій з економічних міркувань, а також мінімальною реактивною потужністю, що генерується перетворювачем.

Таким чином, схема фільтрації може бути спрощена заміною налаштованих фільтрів 11-й і 13-й гармонік на один гасячий фільтр, або заміною на такий фільтр усіх фільтрів системи.

В першому випадку гасячий фільтр, що замінює два налаштованих, повинен бути налаштований на ≈ 12 -у гармоніку (добротність досить велика ($20 \div 50$), в той час як добротність гасячого фільтра вищих гармонік значно менша ($2 \div 4$).

У другому випадку гасячий фільтр також налаштовують на 12-у гармоніку, але для забезпечення низького опору для великих гармонік добротність роблять відносно малою ($2 \div 6$).

7.3 Захист котушками індуктивності

В котушках індуктивності з сердечником магнітний ланцюг не замкнений, тому їх магнітна проникність і індуктивність не залежать від робочого струму. Завдяки зустрічному ввімкненню струмових обмоток такі котушки мають скомпенсоване магнітне поле і відрізняються малими розмірами.

Кожен конденсатор крім ємності C , має паразитну індуктивність L_n , яка залежить від довжини введів конденсатора. Вона найбільша у двохполюсних і найменша у коаксіальних конденсаторів-введів.

В свою чергу, кожна котушка індуктивності крім особистої індуктивності L має паразитну ємність C_n , тому для уявного опору існує залежність від частоти (рис. 7.11), що має резонансну точку.

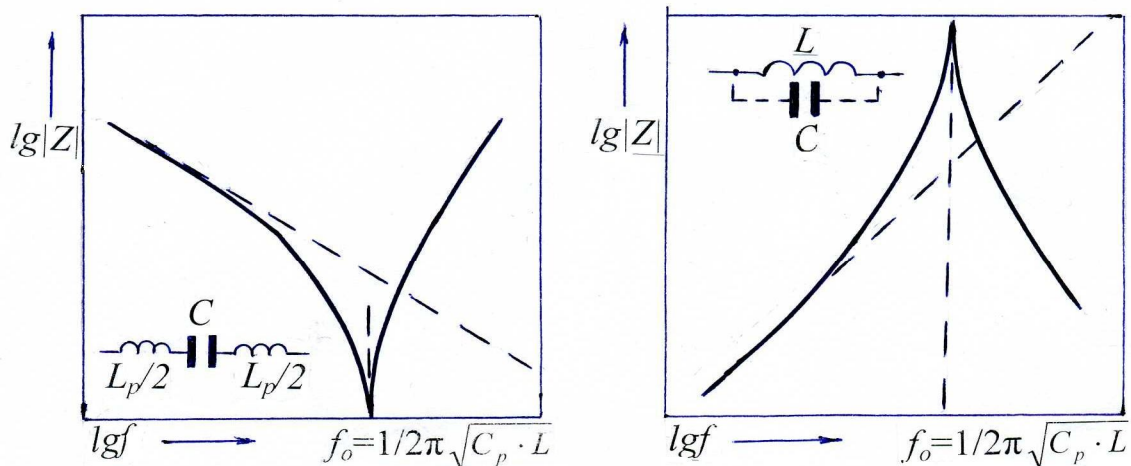


Рисунок 7.11 – Частотні залежності уявних опорів конденсатора – (а), і котушки індуктивності – (б).

Для таких конденсаторів уявний опір визначається з виразу

$$\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_n \quad (7.16)$$

При відсутності індуктивності L_n ідеальна характеристика визначається

$$\lg |\dot{Z}| = \lg(1/2\pi C) - \lg f, \quad (7.17)$$

а з врахуванням індуктивності L_n реальна характеристика

$$\lg |\dot{Z}| = \lg \left| \frac{(f/f_0)^2 - 1}{2\pi C} \right|, \quad (7.18)$$

тут $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL_n}$.

Для котушок індуктивності уявний опір дорівнює

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C_n}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_n}}. \quad (7.19)$$

Ідеальна характеристика котушки без врахування ємності C_n

$$\lg |\dot{Z}| = \lg 2\pi L + \lg f \quad (7.20)$$

Реальна характеристика з врахуванням ємності C_n

$$|\dot{Z}| = \lg \left| \frac{2\pi L}{1 - (f/f_0)^2} \right|, \quad (7.21)$$

тут $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_n L}$.

Для прикладу знайдемо коефіцієнт згасання фільтра-поперечного конденсатора C_x (рис.7.4, а), який має індуктивність за умови $\dot{Z}_Q = \dot{Z}_n + \dot{Z}_A$, $A_{11}=1$, $A_{12} = 0$, $A_{21} = 1/Z_0$, $A_{22} = 1$, тоді з (7.7) знаходимо

$$a_e = 20 \lg |1 + \dot{Z}_A / 2\dot{Z}_0| \quad (7.22)$$

При уявному опорі конденсатора $\dot{Z}_0 = 1/j\omega C + j\omega L_p$, та $\omega_0 = 1/\sqrt{CL_p}$ для резонансної частоти коефіцієнт згасання

$$a_3 = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega C Z_A}{2[1 - (\omega/\omega_0)^2]} \right)^2 \right]. \quad (7.23)$$

Для нерезонансних частот: $\omega \neq \omega_0$:

$$\text{— при } (\omega/\omega_0)^2 > 1 \text{ і } (\omega C Z_A / 2)^2 > 1 \dots \rightarrow a_e = 20 \lg \pi C Z_A + 20 \lg f \quad (7.24)$$

$$\text{— при } (\omega/\omega_0)^2 > 1 \text{ і } (Z_A / 2\omega L_n)^2 > 1 \dots \rightarrow a_e = 20 \lg \pi Z_A / 4\pi L_n - 20 \lg f \quad (7.25)$$

На рисунку 7.12 наведені розраховані згідно (7.19) і (7.20) залежності для конкретного значення Z_A , і залежності коефіцієнта згасання a_e від частоти для різних L і C .

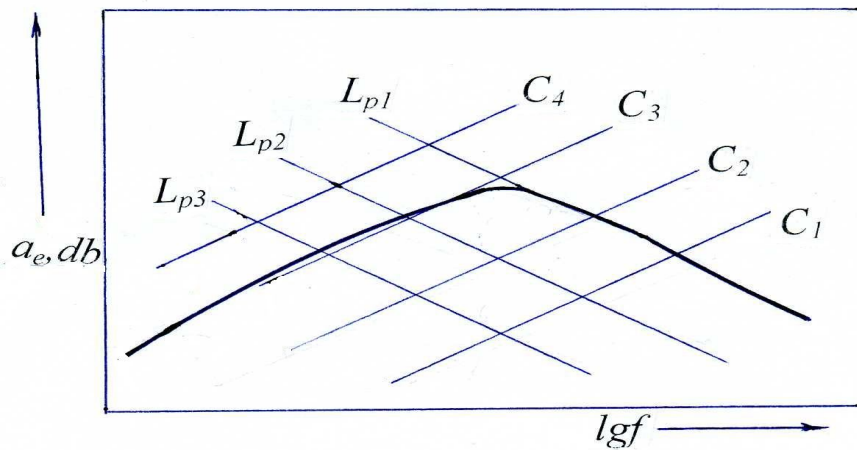


Рисунок 7.12 – Коефіцієнт затування a_e фільтра в залежності від величин конденсаторів і індуктивностей і частоти f .

$$L_{p3} > L_{p2} > L_{p1}; \quad C_4 > C_3 > C_2 > C_1 \quad (7.26)$$

Згідно (7.19)–(7.21) робимо висновок, що при заданій ємності C коефіцієнт затування a_e тим більший, чим більший Z_A і менша паразитна індуктивність конденсатора L_n . Звідки видно, що не кожний конденсатор придатний для фільтра і ємнісний фільтр більш придатний при високих опорах джерела і приймача (табл. 7.2).

На рисунку 7.13 наведені дані про затування LC -фільтра з реальними елементами в залежності від діапазону частот, звідки видно, що коефіцієнт затування визначається параметрами фільтра L, C або паразитними параметрами L_n, C_n .

При низьких частотах елементи фільтра можна вважати ідеальними, коефіцієнт затування a_e збільшується пропорційно квадрату частоти f . Далі починається проявлятися вплив паразитних параметрів L_n, C_n і a_e залишається майже незмінним.

При високих частотах ефект демпфірування в основному визначається паразитними параметрами L_n, C_n і a_e зменшується зворотно пропорційно квадрату частоти f .

Для імпульсної перешкоди необхідно спочатку визначити її спектр і тоді розраховувати параметри фільтра. При відомій формі імпульсу перешкоди в першому наближенні діапазон пропускання фільтра повинен досягати частот $f_g = 1/\Delta t$, або $f_g = 1/T$ (при терміні наростання $T_r = 5$ нс, частота $f_g = 200$ МГц).

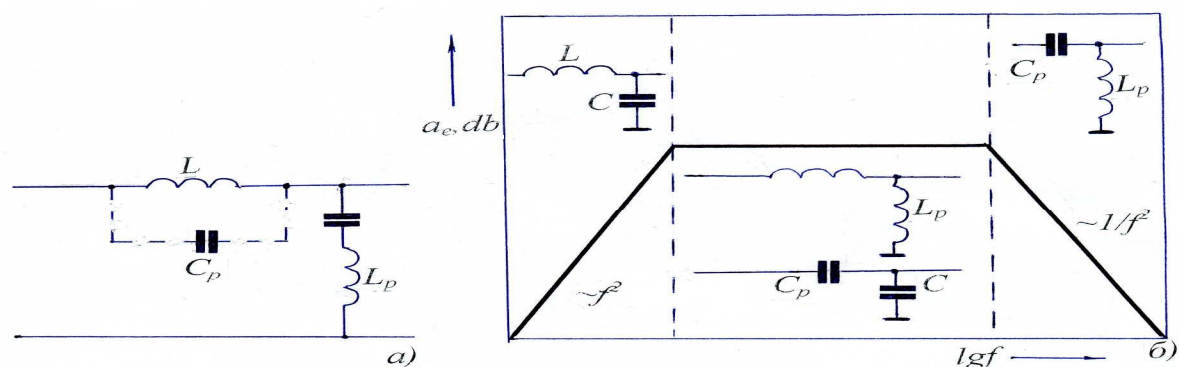


Рисунок 7.13 – Коефіцієнт затухання a_e фільтра LC :

а) – схема заміщення; б) – частотна залежність коефіцієнта затухання a_e .

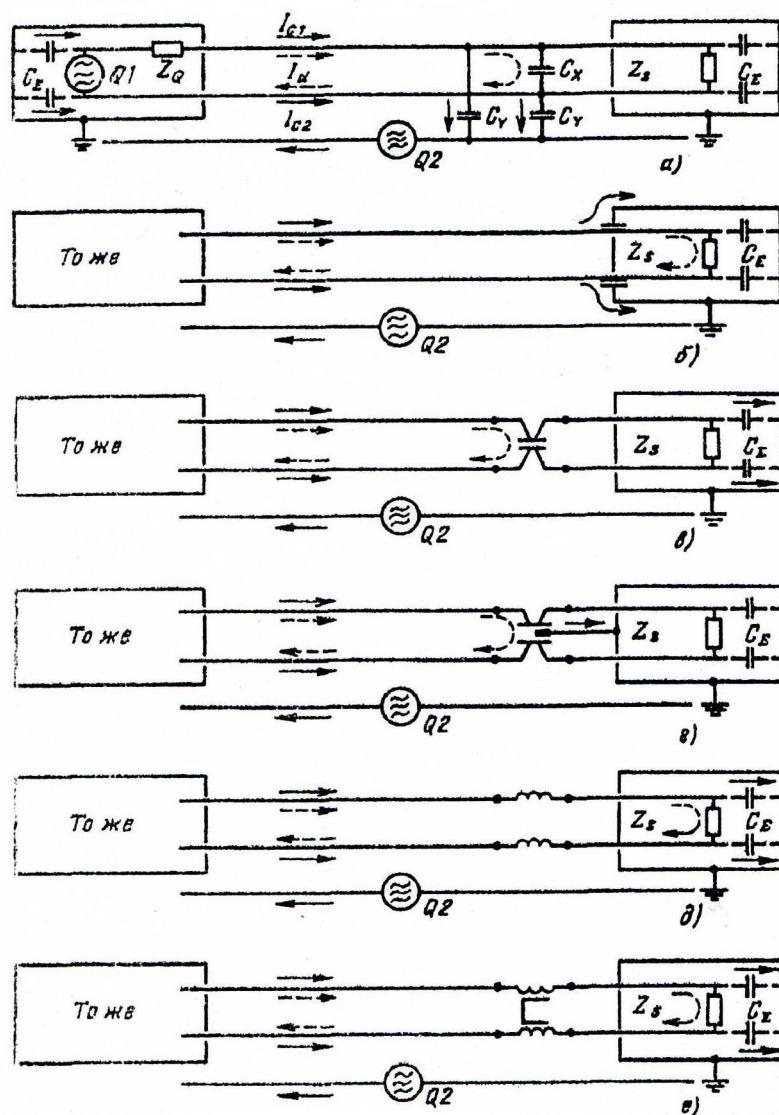


Рисунок 7.14 – Захист котушками індуктивності і конденсаторами від синфазних і протифазних струмів перешкод:

Q_1, Q_2 – джерела протифазних I_d і синфазних I_c струмів перешкод;
 C_E – паразитні ємності схеми відносно заземленого корпусу

Мережні фільтри. Мережні фільтри для придушення перешкод виготовлені як фільтри низьких частот, що вільно пропускають напругу мережі (корисний сигнал) і фільтрують високочастотні імпульсні складові перешкод, що містяться в мережі. Їх використання вирішує подвійну задачу: захист пристроїв від перешкод, що проникають із мережі живлення, та зниження рівня перешкод, які генеруються цим приладом і розповсюджуються по проводам живлення.

Поздовжній елемент фільтра вибирають з врахуванням величини струму живлення з мережі. Зазвичай приймають, що опір зі сторони мережі малий, а зі сторони навантаження – великий. Тому для захисту приладів від перешкод зі сторони мережі використовують фільтри (стрічка 3, табл. 7.2).

На рисунку 7.8, 7.9 наведено схеми фільтрів, що містять котушку індуктивності із скомпенсованим магнітним полем. Фільтр містить конденсатор C_x для демпфірування симетричних напруг завади і два конденсатора C_y для відводу асиметричних струмів перешкоди. Через ці конденсатори, що ввімкнені між проводом мережі і заземленим корпусом, протікає струм, який не повинен перевищувати величини $0,75 \div 3$ мА, що відповідає граничному значенню ємності конденсатора C_y , тобто щоб були виконані вимоги норм ТБ, наприклад, VDE-0565.

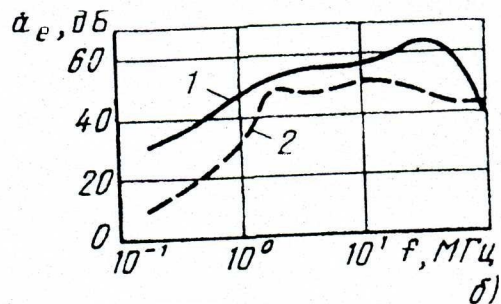
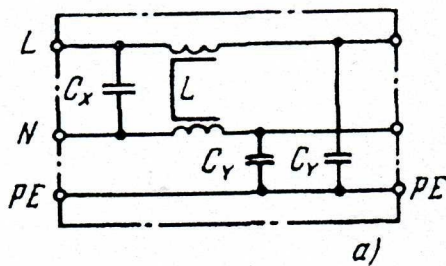


Рисунок 7.15 – Мережний фільтр на 250 В, 1 А: а) – схема; б) – частотна залежність α_e : 1 – асиметричні завади; 2 – симетричні завади

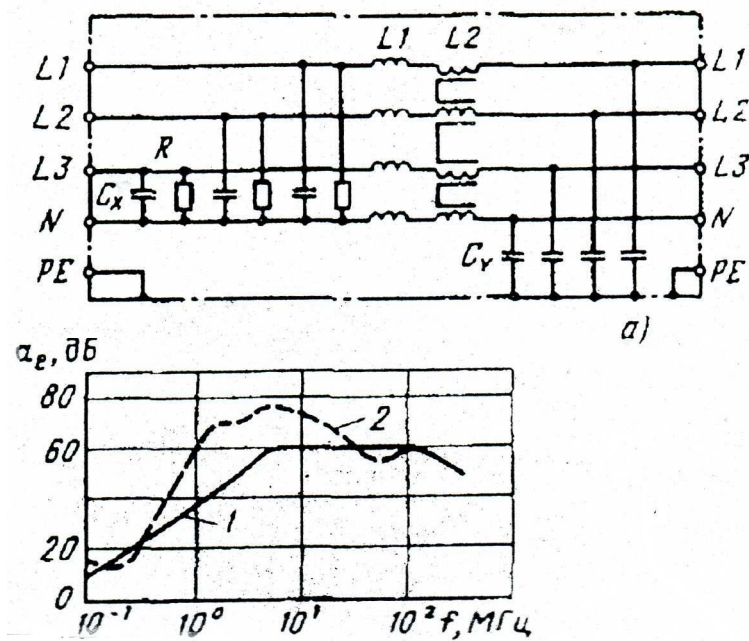


Рисунок 7.16 – Трьохфазний мережний фільтр на 440 В, 16 А: а) – схема, $L1 = 60$ мкГн, $L2 = 4,4$ мГн, $C_x = 2,2$ мкФ, $C_y = 15$ нФ, R – розрядні опори; б) – частотна залежність α_e : 1 – асиметричні завади; 2 – симетричні завади

Фільтри НЧ, ВЧ, «полосові» та загороджувальні. Фільтри низької частоти (ФНЧ) – це фільтри, які пропускають в навантаження лише низькі частоти, починаючи з ω_1 до ∞ . (рис. 7.10, а, б). Полоса затування їх знаходиться в інтервалі від 0 до ω_1 .

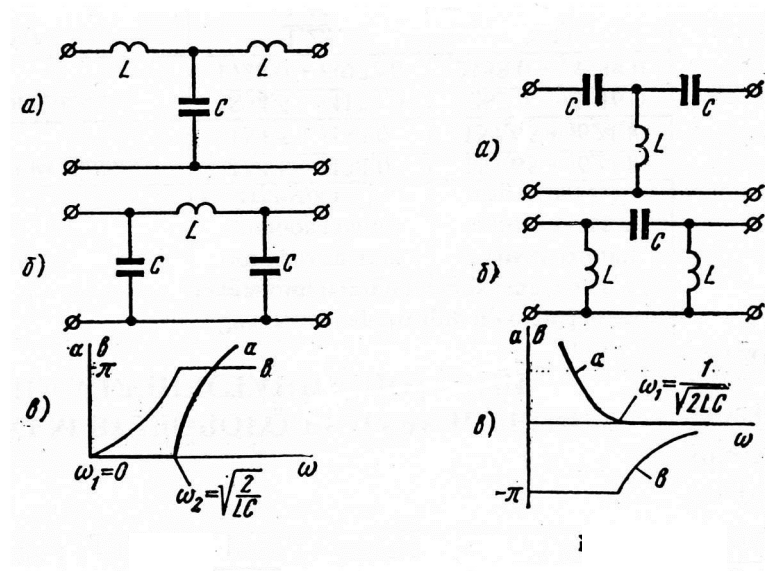


Рисунок 7.17 – Фільтри :
а, б – схеми ФНЧ; в – коефіцієнт затування (а) і коефіцієнт фази (б)

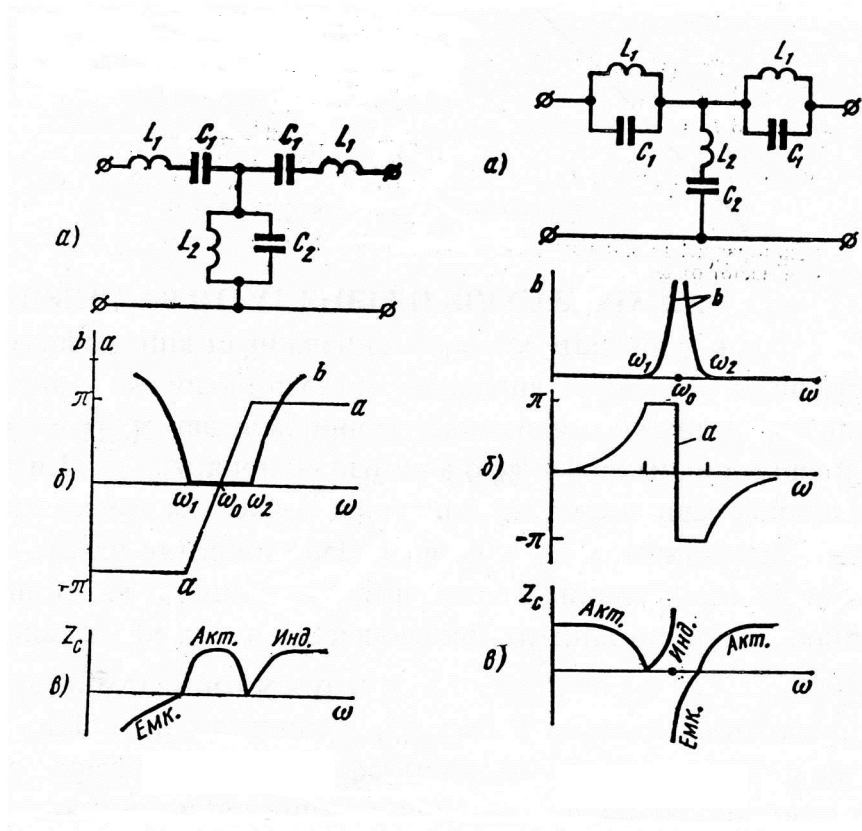


Рисунок 7.18 – Фільтри:

а – схеми ФВЧ, б – коефіцієнт затухання, в – коефіцієнт фази

Величина характеристичного опору Z_c , яка дорівнює вхідному опору фільтру Т-типу НЧ (рис. 7.18, а) дорівнює:

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C} - \omega^2 L^2}. \quad (7.27)$$

При $\omega = \omega_1 = 0$ $Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}$.

При збільшенні частоти – Z_c зменшується і при досягненні $\omega = \omega_2 = \sqrt{\frac{2L}{C}}$ опір $Z_c = 0$.

Для П-фільтра НЧ (рис. 7.10, б)
$$Z_c = \left(\frac{2C}{L} - \omega^2 C^2 \right)^{-1/2}. \quad (7.28)$$

Для Т-фільтра ВЧ (рис. 7.11, а)

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C} - \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (7.29)$$

Характер зміни Z_c : при $\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{2LC}}$, $Z_c = 0$, і при збільшенні частоти ω

опір Z_c зростає і при $\omega \rightarrow \infty$ $Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}$.

Для П-фільтра ВЧ (рис. 7.11, б)

$$Z_c = \left(\frac{2C}{L} - \frac{1}{\omega^2 L^2} \right)^{-1/2}. \quad (7.30)$$

Для визначення характеру Z_c (індуктивний чи ємнісний) в полосі затухання, необхідно визначити характер вхідного опору цього фільтра для граничного режиму: для схем рисунка 7.17, а, б – для дуже низькій частоті і для схем рисунка 7.18, а, б – при дуже високій частоті.

В результаті знайдемо, що в зоні затухання:

для Т-фільтра НЧ рисунка 7.10, а Z_c – індуктивне

для П-фільтра НЧ рисунка 7.10, б Z_c – ємнісне

для Т-фільтра ВЧ рисунка 7.11, а Z_c – індуктивне

для Т-фільтра ВЧ рисунка 7.11, а Z_c – ємнісне.

«Полосові фільтри» це фільтри, які пропускають в навантаження лише вузьку смугу частот від ω_1 до ω_2 . Зліва від ω_1 і справа від ω_2 знаходяться ділянки затухання (рис. 7.19, б).

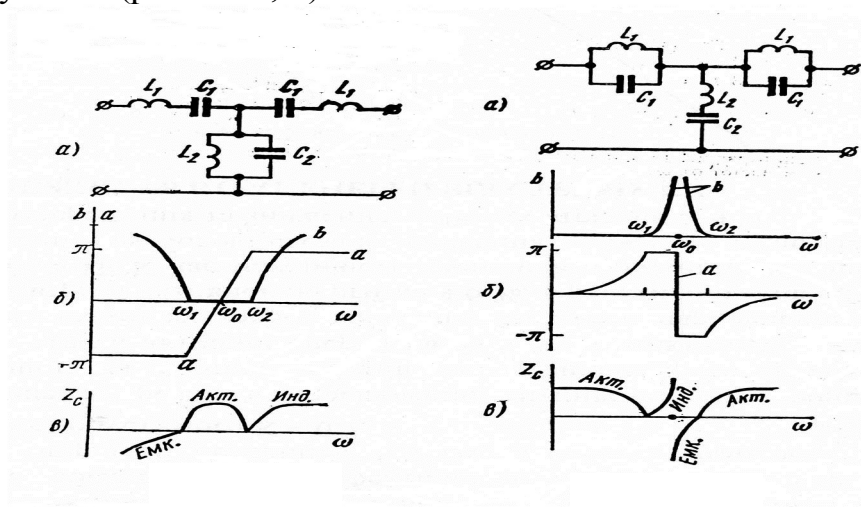


Рисунок 7.19 – Фільтри

На рисунку 7.19, а – схема найпростішого «полосового» фільтра. Його параметри повинні задовольняти умові: $L_1 C_1 = L_2 C_2$. На рисунку 7.19, б показано характер зміни α – коефіцієнта фази, і b – коефіцієнта затухання по заданим частотам f_1 і f_2 і опору навантаження фільтра Z_c .

Резонансна частота $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$,

$$C_1 = \frac{f_1 - f_2}{2\pi f_1 f_2 Z_c}, \quad L_1 = \frac{Z_c}{2\pi(f_1 - f_2)}. \quad (7.32)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi Z_c (f_2 - f_1)}; \quad L_2 = \frac{Z_c (f_2 - f_1)}{4\pi f_1 f_2}. \quad (7.33)$$

Загороджувальні фільтри – це фільтри, у яких смуга прозорості розрізана на дві частини ділянкою затухання (рис. 7.21, а). Зліва від частоти ω_1 і справа від частоти ω_2 розташовані дві частини смуги прозорості (рис. 7.12, б).

В схемі параметри $L_1 C_1 = L_2 C_2$.

Приклад. Визначити параметри «полосового» фільтра, який повинен пропускати полосу частот від $f = 750$ до $f = 850$ Гц при опорі навантаження $Z_c = 800$ Ом.

Рішення: 1) резонансна частота $f_o = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{750 \cdot 850} = 798$ Гц

$$2) C = \frac{850 - 750}{2\pi \cdot 750 \cdot 850 \cdot 800} = 0,0312 \text{ мкФ};$$

$$3) L_1 = \frac{800}{2\pi(850 - 750)} = 1,273 \text{ Гн};$$

$$4) C_2 = \frac{1}{\pi \cdot 800 \cdot 100} = 3,94 \text{ мкФ};$$

$$5) L_2 = \frac{800 \cdot 100}{4\pi \cdot 750 \cdot 850} = 0,01 \text{ Гн}.$$

RC-фільтри. Якщо опір навантаження фільтра дуже великий, то використовують RC-фільтри, (рис. 7.20, а) – (НЧ); б – (ВЧ); в – «полосовий»; та їх характеристики: г, д, е.

де $a = \ln \frac{U}{U_2} = f(\omega)$.

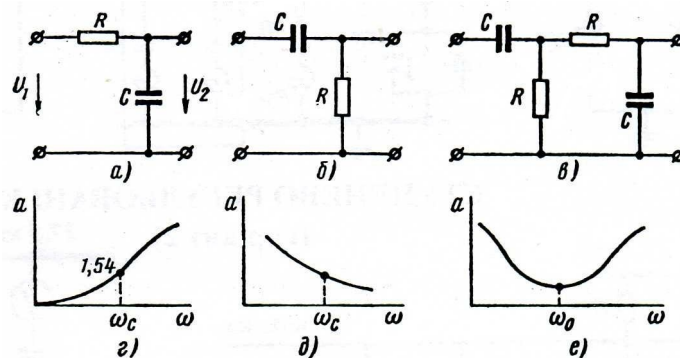


Рис. 3.

Рисунок 7.20 – Схеми фільтрів НЧ, ВЧ і «полосового» RC-фільтра та їх залежності $a = \ln(U_1/U_2) = f(\omega)$

Для всіх RC-фільтрів в робочій зоні $a \neq 0$. Робоча зона ФНЧ простирається від $\omega = 0$ до $\omega = \omega_c = 1/RC$, якщо $a = 1,54$ неп.

Для ФВЧ робоча зона знаходиться в діапазоні від $\omega = \omega_c = 1/RC$, якщо $a = 1,54$ неп, до $\omega = \infty$.

В «полосовому» фільтрі мінімальне затухання буде при $\omega = \omega_0 = 1/RC$.

Характер позовжнього опору фільтра:

- якщо позовжній опір складається тільки з індуктивності, то фільтр відноситься до категорії НЧ;
- якщо позовжній опір чисто ємнісний – то це фільтр ВЧ;
- якщо позовжній опір складається з послідовних L і C – то це фільтр «полосового» типу;
- якщо позовжній опір складається з паралельних L і C – то це загороджувальний фільтр.

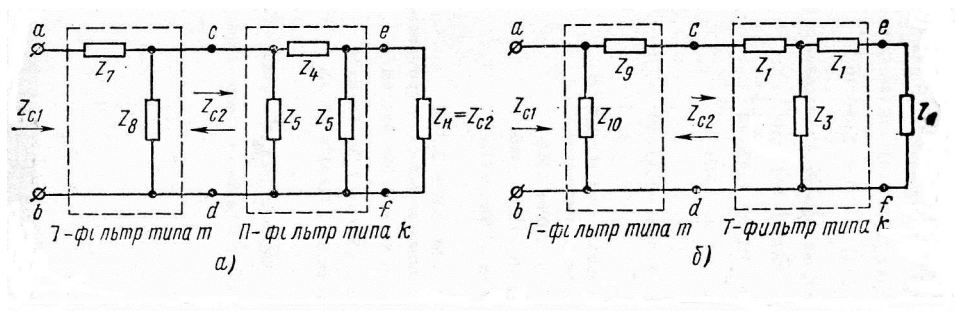


Рисунок 7.21 – Каскадне включення фільтрів

Для збільшення крутизни характеристики $Q = f(\infty)$ на початку ділянки затухання, а також для отримання заданої величини затухання при даній частоті і для меншої залежності Z_c від частоти в смузі прозорості використовують каскадне включення фільтрів типу $\Gamma + \Pi$ або $\Gamma + \Pi + \Gamma$. При каскадному включенні завжди виконується принцип погодження навантаження.

7.4 Обмежувачі перенапруг

Обмежувачі перенапруг – це клас приладів для зниження перенапружень в електроенергетичних і інформаційно-електронних системах, які виникають при ударах блискавки, розрядах статичної електрики, комутаційних процесах та ін. Вони виконують захисні функції запобігання виходу з ладу електричних і електронних приладів і порушення нормального функціонування системи в цілому.

Принцип дії обмежувачів базується на використанні резисторів R_v , які мають нелінійну вольт-амперну характеристику (рис. 7.10). Особливістю їх є те, що при робочих напругах резистори мають дуже великий опір, а при перевищенні напруги – опір різко зменшується. Разом з опором джерела перенапруги, обмежувач утворює схему нелінійного діляника напруги (рис. 7.10,б), який і знижує величини перенапруження до допустимого рівня, що не перевищує електричну міцність захищеного елемента.

$$U_{3t}'' = U_{3t} - I_{3t}'' R_Q \quad (7.33)$$

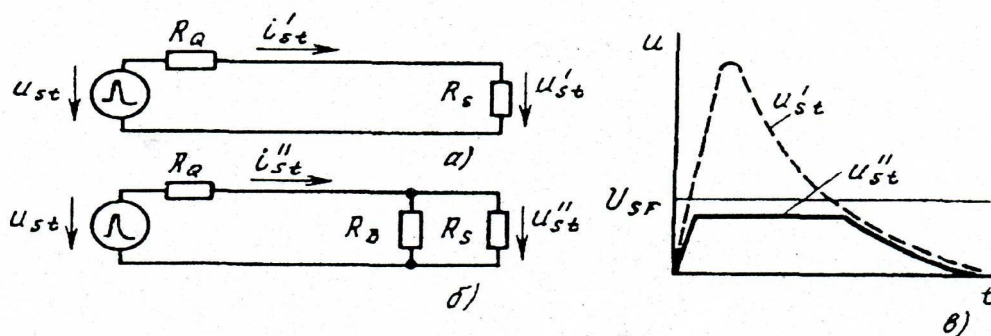


Рисунок 7.23 – Обмеження перенапружень за допомогою нелінійного резистора R_B :

а) – схема без захисту; б) – схема із захистом; в) – зміна напруги з часом;
 U_{St} – імпульсна міцність вхідної мережі

Захисні елементи. Для захисту від перенапружень використовують також захисні розрядні проміжки, варистори і лавинні діоди. Оскільки принцип дії їх суттєво різний, то і робочі характеристики суттєво відрізняються: це, насамперед:

- напруга і час спрацювання;
- рівні обмеження та ступень точності обмеження перенапруги;
- допустиме струмове навантаження;
- остаточна напруга, загасаючі властивості та ін.

Розрядники виготовляють у вигляді повітряних, газонаповнених пристроїв або елементів із ковзним поверхневим розрядом і всі вони виконують функцію грубого захисту.

Конструктивно – це два електрода, рознесених на певну відстань, які розміщені в скляному або керамічному корпусі наповненому інертним газом. Оскільки опір такого проміжку $\sim 10^{10}$ Ом, а ємність менша за 10 пФ, то вони не впливають на роботу захищеної системи.

При перевищенні величини робочої напруги до U_z розрядний проміжок пробивається, при цьому його опір зменшується на 10 порядків і напруга на захищаній системі зніжується до величини U_G (рис. 7.11).

Напруга пробою газонаповненого розрядника U_z залежить від діючої напруги du/dt (при $du/dt = 100$ В/с визначається статична U_{zc} ; а при $du/dt = 1$ кВт/мкс – динамічна напруга пробою розрядника $U_{zd} = (600 \div 700)$ В).

При дуже коротких (менших 30 нс) імпульсах напруги газонаповнений розрядник не спрацьовує.

Газонаповнені розрядники надійно пропускають стандартні імпульси струмів (8/20 мкс) амплітудою до декількох десятків кілоампер, але не спроможні самостійно гасити струми, що не перевищують 1 А. Тому їх вмикають послідовно із захисним апаратом, який спроможний гасити такий супроводжуючий струм.

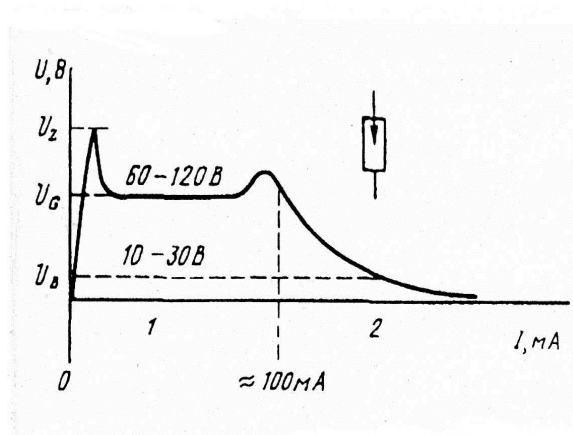


Рисунок 7.24 – Вольт-амперна характеристика газонаповненого розрядника:
 U_z – напруга запалювання; U_G – напруга гасіння; 1 – ділянка початкових тліючих розрядів; 2 – ділянка дугових розрядів

Повітряні захисні проміжки. Їх виготовляють у вигляді двох електродів, що розташовані на визначеній відстані; по розрядним і робочим характеристикам вони близькі до газонаповнених розрядників. Оскільки вони не спроможні відсікати супроводжуючий струм, то захисні проміжки використовують лише в комбінації з запобіжниками або варисторами в якості дугогасників.

В місцях зближення грозозахисних пристроїв з іншими заземленими частинами системи електрозабезпечення або металевими конструкціями, які по вимогам корозійної стійкості, не можуть бути гальванічно з'єднані, використовують також закриті повітряні (так звані розділюючі) проміжки.

Розрядники на основі ковзного розряду. Такі розрядники містять між електродами ізоляцію, тому їх вольт-секундні характеристики більш пологі і вони, незалежно від крутизни імпульсу, можуть обмежувати перенапруги величиною до 3 кВ. Вони також спроможні гасити супровідний струм, – тому найбільш придатні для грубого захисту в ланцюгах електроживлення.

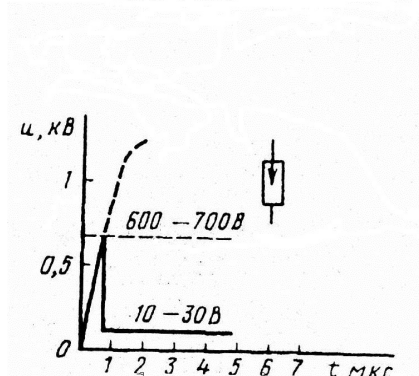


Рисунок 7.25 – Типова характеристика запалення газонаповненого розрядника

Варистори (Variable Resistors). Це елементи мають симетричну вольт-амперну характеристику (рис. 7.26).

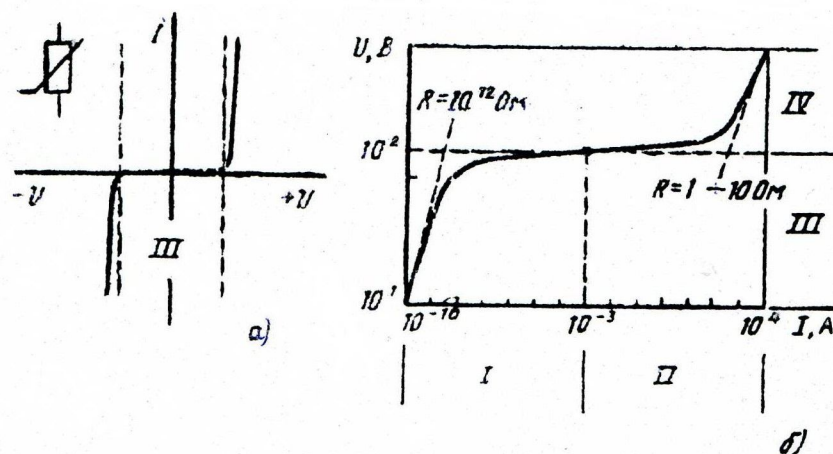


Рисунок 7.26 – Вольт-амперні характеристики варисторів в лінійних – (а) і логарифмічних координатах – (б).

При $I > 0$ вона має вид

$$I = K \cdot U^\alpha, \quad (7.34)$$

тут K – константа, залежна від розміру резистора, α – ступень не лінійності варистора, яка у сучасних металооксидних варисторів досягає 40.

Принцип дії варистора полягає у зменшенні його опору R на багато порядків при перевищенні робочої напруги

$$R = 1/K \cdot U^{\alpha-1}. \quad (7.35)$$

Час обмеження перенапруги складає десятки наносекунд і визначається індуктивністю струмопроводів, а оскільки їх особиста ємність складає величину порядку $0,4 \div 40$ пФ, то їх неможливо використовувати в високочастотних системах. Захисна спроможність варисторів може бути як в діапазоні низьких, так і високих напруг, при цьому вони спроможні поглинути значну енергію. При періодичних тривалих перенапругах варистор нагрівається і може відбутися його тепловий пробій.

Кремнієві лавинні діоди (Z-діоди, стабілітрони напругою $U_z = 3 \div 200$ В) – використовують для стабілізації напруги та захисту від перенапруг в електронних схемах. Вони мають властивість не пошкоджуватись при напругах, які перевищують граничну величину, в межах якої вони знаходяться в закритому стані.

Існують також спеціальні лавинні діоди (супрессдіоди, трансвільдіоди, та Z-діоди), які мають підвищену пропускну спроможність по струму, малий час (пікосекунди) запізнення, велику поглинаючу енергією. На рисунку 7.27 наведені характеристики Z-діода та стабілітрона, які дуже схожі. Рівні обмеження перенапруг ними складають $6 \div 440$ В.

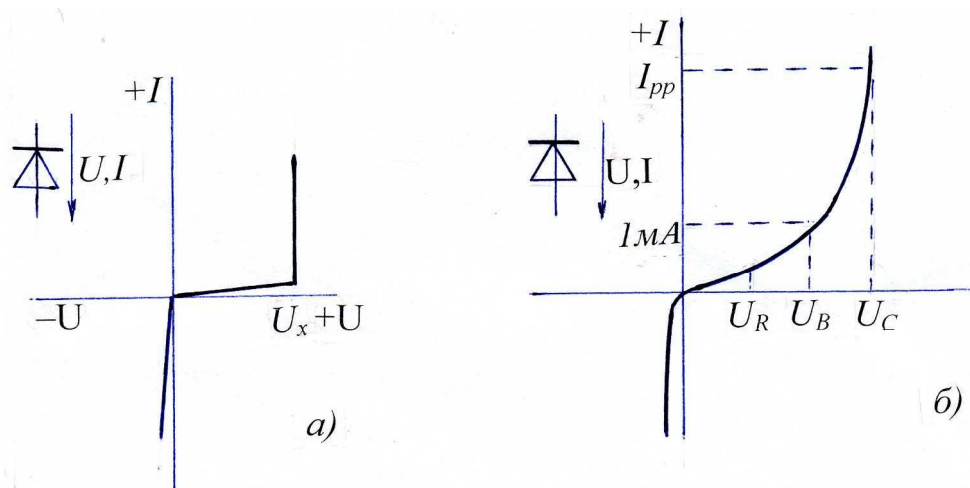


Рисунок 7.27 – Вольт-амперні характеристики Z-діода – (а) та обмежувального стабілітрона – (б):

U_R – максимальна напруга закритого стабілітрона;

U_B – напруга початку обмеження, при якому струм $I = 1$ мА;

U_c – напруга обмеження імпульсу струму $I_{pp} = 8/20$ мкс

7.5 Екранування обладнання

Поняття «придушення» перешкод слугує для характеристик захисної дії засобів захисту від їх негативного впливу на роботу обладнання. Ступінь придушення залежить від частоти перешкоди. В якості однієї кількісної характеристики ступені придушення перешкод на тій чи іншій частоті служить логарифм відношення напруги на вході U_1 та виході U_2 фільтра, який називається коефіцієнтом затухання a_ϕ , або коефіцієнтом екранування a_ϵ поля в точках простору перед екраном – H_o та за ним – $H_{вт}$.

Екранування застосовують для послаблення впливу електричних, магнітних та електромагнітних полів, які генеруються різноманітними джерелами, на елементи системи, прилади, кабелі, робочі приміщення.

Екрани встановлюють між джерелом і приймачем полів для зниження напруженості E_o , H_o діючих полів до величини E_1 , H_1 за екраном (рис. 7.28).

Принцип екранування обумовлений наведенням на поверхні екрана зарядів або індукування в ньому струмів, поле яких накладається на поле джерела перешкод, послабляючи його. Ефективність екранування суттєво залежить від частоти поля, електропровідності і магнітної проникності матеріалу екрана, конфігурації і геометричних розмірів та форми екрана.

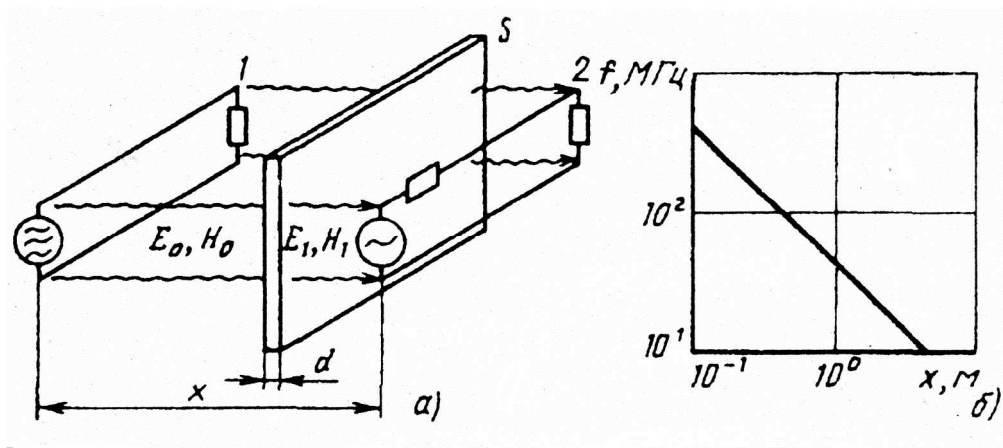


Рисунок 7.28 – Принцип захисту контуру від зовнішніх електричних і магнітних полів:

а) – взаємне розташування контурів 1, 2 і екрана S ; б) – границя між умовами ближнього (нижня ліва частина) і дальнього (верхня права частина) полів

Розглянемо співвідношення параметрів полів і вплив характеристик екрану на їх величину: позначимо коефіцієнт, обумовлений поглинанням енергії поля, – α_{3A} і коефіцієнт затухання обумовлений частково відбиттям – α_{3R} . Результуючий коефіцієнт затухання, дБ визначимо як $a_3 = \alpha_{3R} + \alpha_{3A}$.

тоді

$$a_3 = 20 \lg(E_o / E_1), \quad (7.36)$$

$$a_3 = 20 \lg(H_o / H_1). \quad (7.37)$$

Для розуміння зв'язків між коефіцієнтами затухання, характеристиками магнітного поля, розмірами та властивостями матеріалу екрану введемо поняття повного опору по аналогії з розповсюдженням хвиль в електричній довгій двохпровідній лінії. (рис. 7.16). В залежності від відстані x між джерелом і приймачем поля і частотою f в ближній і дальній зонах коефіцієнти затухання α_{3R} , α_{3A} визначаються з виразу:

– для магнітного поля в ближній зоні ($x < c/2\pi f$) коефіцієнт відбиття

$$\alpha_{3R} = [15 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) + 20 \lg(x / x_0)] + 10 \lg(f / f_0); \quad (7.38)$$

– для електричного поля у цій зоні ($x < c/2\pi f$)

$$\alpha_{3R} = [202 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 30 \lg(f / f_0); \quad (7.39)$$

– для електричного поля в дальній зоні ($x > c/2\pi f$)

$$\alpha_{3R} = [168 - 10 \lg((\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 10 \lg(f / f_0); \quad (7.40)$$

– коефіцієнт поглинання для ближньої та дальньої зони

$$\alpha_{3A} = [(0,1314 d/d_0 \sqrt{\mu_r \sigma_r})] \sqrt{f/f_0}, \quad (7.42)$$

де μ_r , σ_r – відносна магнітна проникність та електропровідність, віднесена до електропровідності міді ($\sigma_m = 5,8 \cdot 10^7$ См/м; $f_0 = 1$ Гц – базова частота;

d – товщина екрану, віднесена до $f_0 = 1$ мм; $x_0 = 1$ м.

Таким чином коефіцієнт затухання поля залежить від частоти f , товщини d і електропровідності σ матеріалу екрана.

Ефективність екрана оцінюють наступним чином:

- якщо α_3 не вищий за 10 дБ – то екранування не достатнє;
- при $30 > \alpha_3 > 10$ дБ – достатнє;
- при $60 > \alpha_3 > 30$ дБ – хороше.

Ефективність екранування залежить також від наявності дефектів і отворів в екрані, тріщин, кабельних введів, технологічних отворів.

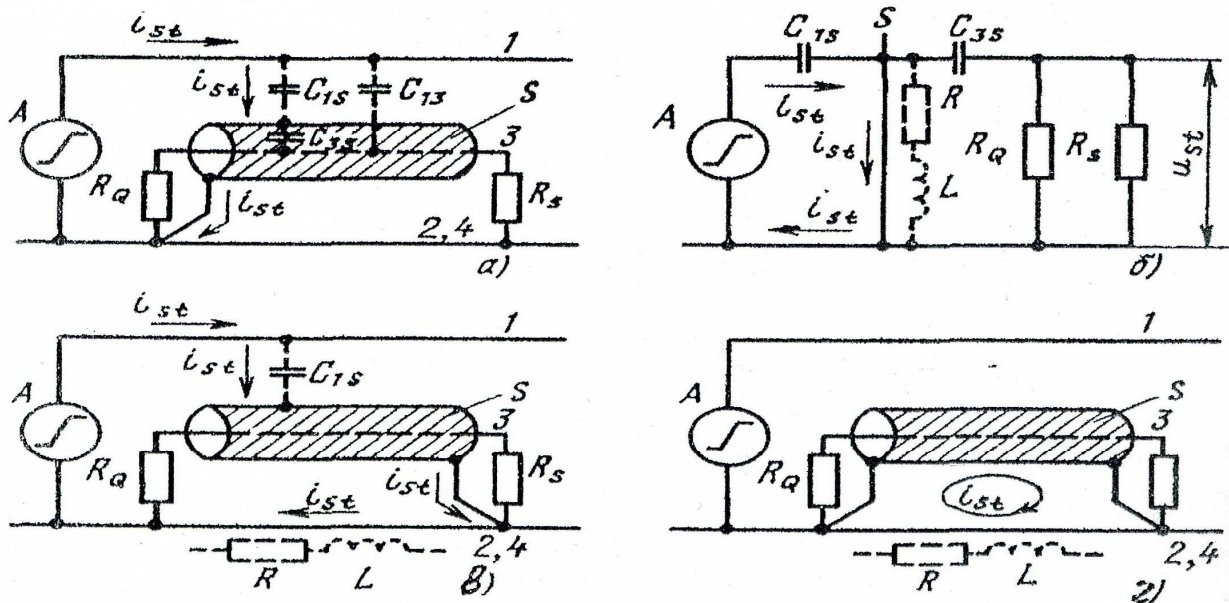


Рисунок 7.29 – Приклади екранування лінії:

- а) – з'єднання екрану S з системою опорного потенціалу 2, 4;
 б) – схема заміщення; в) – не вірне з'єднання екрану з системою опорного потенціалу; г) – Двохстороннє з'єднання екрану; A – джерело завад $\Delta u/\Delta t$;
 R_Q – вихідний опір джерела завад; R_S – вхідний опір в екранованому контурі

Екранування приладів та приміщень. Металеві корпуси електронних приладів забезпечують певний захист від проникнення електромагнітних полів при умові, що усі отвори та щілини усунуті шляхом ущільнювання. Це забезпечує коефіцієнт затухання інтенсивності випромінювання на $40 \div 100$ дБ в діапазоні частот 30 МГц \div 1 ГГц.

Ефективне екранування електронних приладів здійснюється також шляхом металізації поверхні корпусу. В деяких випадках, таких як ВЦ, в промисловості, банках, дослідницьких центрах та ін. – виконують електромагнітне екранування цілих приміщень з метою не тільки захисту від проникнення шкідливого впливу зовні, але також і витоку конфіденційної інформації.

Сучасне екранування приміщень здійснюють по модульному принципу, який полягає у створенні однорідної провідної і відбиваючої електромагнітне випромінювання оболонки з коефіцієнтом затухання $80 \div 100$ дБ.

Екранування кабелів. Кабельні екрани необхідні для зменшення впливу зовнішніх полів і випромінювання полів кабелями, а також забезпечення розв'язки проводів, що прокладаються разом з кабелями. При цьому суттєву роль відіграє спосіб заземлення екрану:

– якщо він заземлений з одного кінця, то зменшується поперечна напруга поля E завдяки байпасної дії екрану;

– при двосторонньому заземленні екрана утворюється замкнений контур, у якому при зміні магнітного поля H в часі індуктується струм I і поздовжнє поле при цьому зменшується: $\dot{U}_1 = \dot{Z}_k I < \dot{U}_1$, де \dot{Z}_k – повний комплексний опір зв'язку екранованого кабелю.

При недостатньому затуханні використовують два ізольованих один від одного екрана. При двосторонньому заземленні внутрішнього екрану поздовжня напруга

$$\dot{U}_1 = I \frac{\dot{Z}_{K_a} \dot{Z}_{K_i}}{\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i} + j\omega L}, \quad (7.41)$$

а при односторонньому заземленні

$$\dot{U}_1 = I \frac{\dot{Z}_{K_a} \dot{Z}_{K_i}}{\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i} + 1/j\omega L}, \quad (7.42)$$

тут L – індуктивність з'єднання, C – ємність між екранами, \dot{Z}_{K_a} і \dot{Z}_{K_i} – повні комплексні опори внутрішнього і зовнішнього екранів.

З цих рівнянь видно, що двостороннє заземлений внутрішній екран при низьких частотах мало ефективний, оскільки паралельно з'єднані лише \dot{Z}_{K_a} і \dot{Z}_{K_i} , а при високих частотах ($|j\omega L| \gg |\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i}|$) – значно краще екранування, ніж при одному екрані.

При односторонньому заземленні внутрішнього екрану ситуація зворотна.

Таким чином, в залежності від частоти джерела поля перешкод, внутрішній екран необхідно заземлювати з одної або з обох сторін.

Зовнішній екран не варто заземлювати всередині корпусу, бо при цьому втрачається ефективність екранування самого корпусу.

Для найбільш ефективного використання кабельних екранів, необхідно:

- звичайні екрани і зовнішні оболонки подвійних екранів повинні мати на обох кінцях хороші контакти з корпусами приладів;
- внутрішній екран, в залежності від частоти поля перешкоди, необхідно заземлювати з однієї або двох сторін;
- зовнішній екран не можна вводити всередину приладу або там заземлювати, оскільки при цьому втрачається екранна дія корпусу.

Отже, екранування кабелів слугує і для того, щоб знизити вплив різниці потенціалів між точками заземлення корпусів приладів, які пов'язані кабелями.

Екрани виготовляють з добре провідного матеріалу, щоб на його опорі R і індуктивності L (рис. 7.29, б) не було падіння напруги, яка б накладалася на корисний сигнал в захищеному корпусі. Екран в джерелі живлення необхідно з'єднувати з проводом системи опорного потенціалу.

Двохстороннє приєднання екрану до системи опорного потенціалу (рис. 7.29, г) доцільно, якщо екран повин послабити дію магнітного поля.

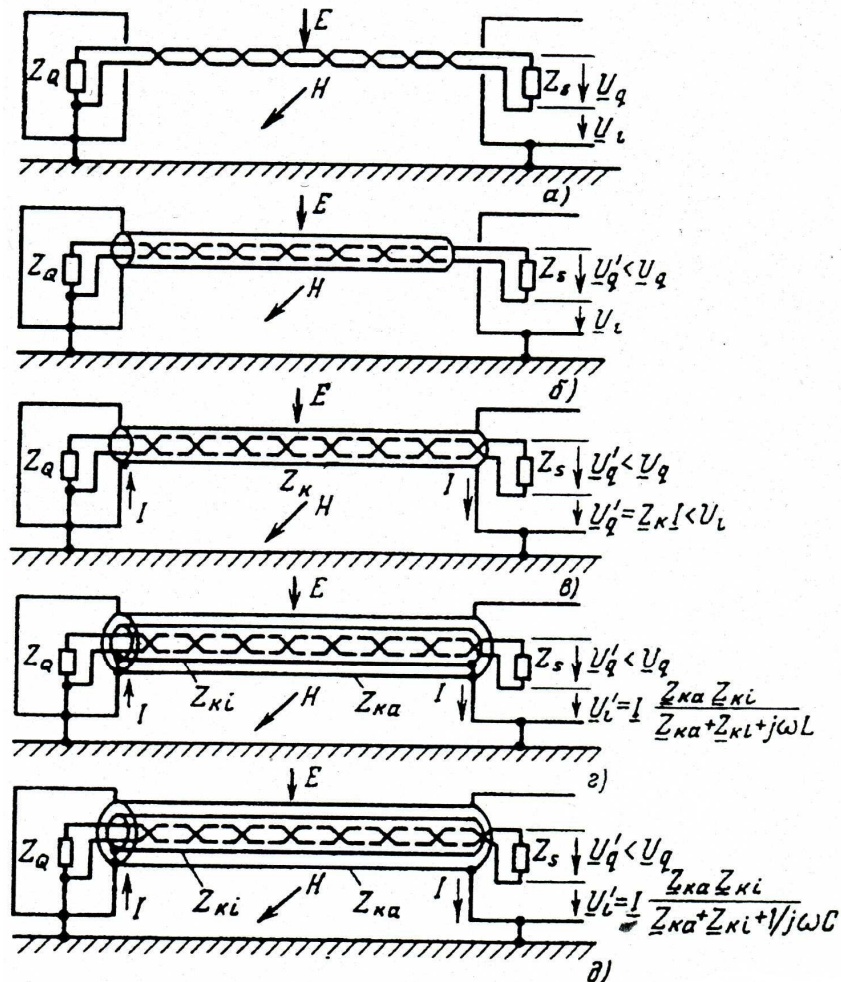


Рисунок. 7.30 – Варіанти екранування кабелів:

- а) – неекраниваний кабель; б) – одностороннє заземлення екрану;
- в) – двохстороннє заземлення; г) – кабель з подвійним екраном і двостороннім заземленням внутрішнього екрану; д) – кабель з подвійним екраном і одностороннім заземленням внутрішнього екрану

При цьому струм i_{zt} в контурі, який утворений екраном S і проводом опорного потенціалу, не повин створювати в проводах 2, 4 неприпустимих напруг перешкод, що попадають в захищений контур.

Струмові контури з великою ємністю. В довгих заземлених з одної сторони сигнальних лініях при появі напруги $\Delta u/\Delta t$ виникає струм перешкоди i_{zt} , обумовлений ємностями C_1 і C_2 . Внаслідок несиметрії відносно землі частина синфазної напруги Δu перетворюється в протифазну напругу u_{zt} , яка накладається на напругу корисного сигналу (рис. 7.18, а). Для синусоїдальної мережної напруги Δu сумарна напруга перешкоди становить:

$$U_{zt} = \Delta U / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_1 R_Q)^2}. \quad (7.43)$$

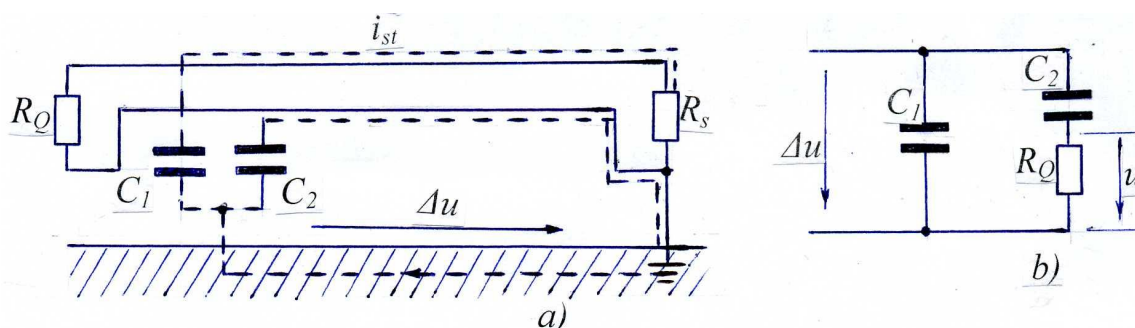


Рисунок 7.31 – Одностороннє заземлена лінія з великими ємностями на землю C_1 і C_2 (а), та її схема заміщення при $R_S \gg R_Q$ (б)

Для усунення перешкод рекомендують:

- усунути гальванічний зв'язок між системою опорного потенціалу і корпусом приладу;
- зробити сигнальний контур максимально низькоомним (малі величини R_Q і R_S);
- екранувати сигнальну лінію, в результаті чого напруга перешкоди знизиться до величини

$$U_{zt}^* = \Delta U' / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_{zt} R_Q)^2} \quad (7.44)$$

Рекомендовані засоби боротьби з перешкодами полягають у наступному:

- усуненню гальванічного зв'язку між системою опорного потенціалу і корпусом приладу (при високих частотах – це не ефективно);
- екрануванню сигнальної лінії (рис. 7.19, а, б);
- виконання сигнального контуру по можливості низькоомним.

При заземленні екрану (рис. 7.19, в) можливе збільшення ємності проводу відносно землі $C_{SL} > C_1$, що призводить до збільшення напруги перешкоди, – чим без екрану.

Ефект зниження напруги перешкод можна отримати:

- при симетричному відносно землі розташування ліній передачі сигналів (рис. 7.19, д, е); при повній симетрії $U_{zt} = 0$;
- застосування на приймальному кінці розділяючих елементів (реле, роздільний трансформатор (рис. 7.19, ж, з).
- використання для передачі корисних сигналів світловодів (рис. 7.19, и), що повністю усуває вплив ємності C_{zt} .

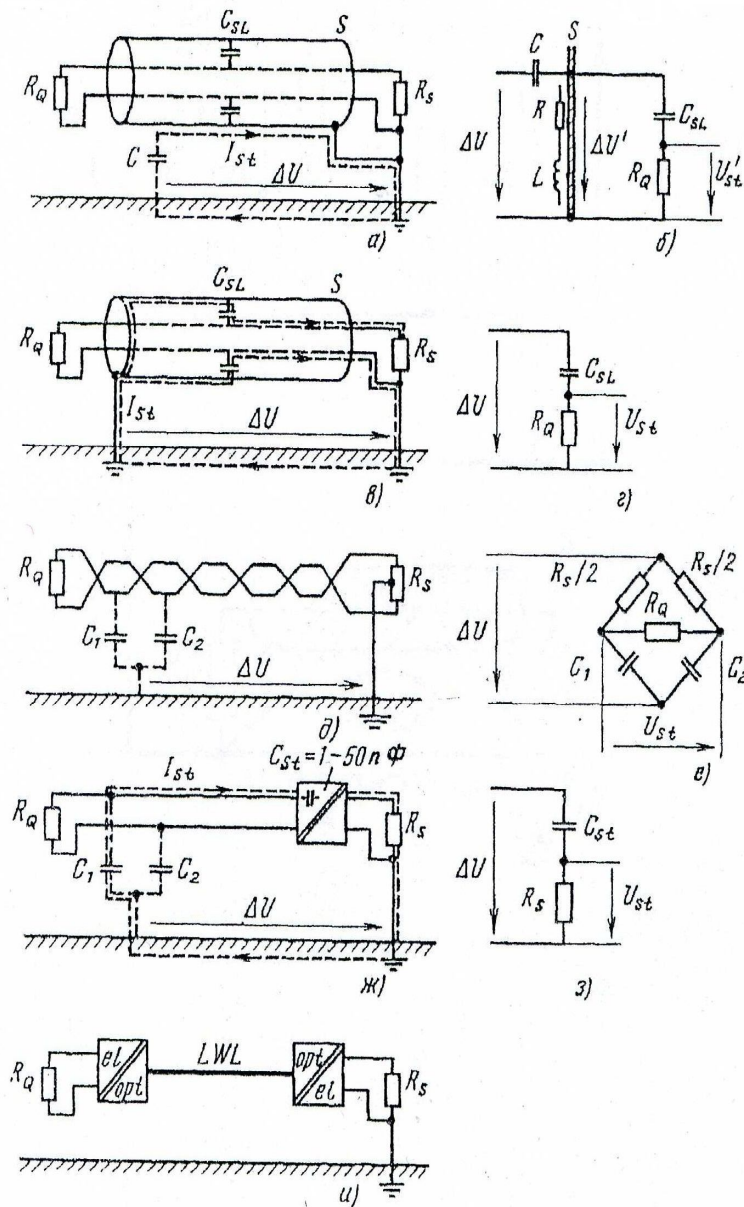


Рисунок 7.32 – Приклади захисту контурів з великими ємностями відносно землі

Якщо по техніко-економічним або експлуатаційним умовам неможливо прокласти трасу ПЛ або ЛЗ, щоб індуковані в проводах ЛЗ напруги не перевищували допустимих значень, використовують спеціальні методи захисту, до яких відносяться:

- застосування хороше провідних заземлених грозозахисних тросів, а також спеціальних провідників, прокладених в землі;
- часткове розземлення нейтралів трансформаторів високовольтної мережі, що забезпечує зниження струмів КЗ;
- використання на ПЛ з ізолюваною нейтраллю апаратури для контролю стану ізоляції фазних проводів по відношенню до землі, або перекосу фазних напруг, що дозволяє знаходити і усувати електричний вплив ПЛ на ЛЗ;
- часткове або повне кабелювання ПЛ із заземленою нейтраллю;
- використання швидкодіючого захисту для відключення пошкодженої ПЛ із заземленою нейтраллю.

До спеціальних методів захисту ЛЗ відносяться:

- ввімкнення спеціальних розрядників між кожним проводом і землею. Для повітряних ЛЗ загальна кількість розрядників на 100 км ЛЗ не повинна перевищувати для ущільненого ланцюга – 15 шт., а для не ущільненого – 25 шт. Допустима кількість розрядників обмежена експлуатаційними міркуваннями і можлива установка більшого їх числа. Захист розрядниками ланцюга напівавтоматичної блокіровки і ланцюгів фідерних ліній провідного радіо не припускається;
- включення розділювальних трансформаторів в телефонні ланцюги без дистанційного живлення і розділювальних трансформаторів з захисними контурами при наявності дистанційного живлення;
- включення дренажних котушок або дроселів із заземленою середньою точкою в телефонні мережі без дистанційного живлення і дренажних котушок з резонансними заземлюючими контурами в телефонні ланцюги з дистанційним живленням;
- часткове або повне кабелювання ЛЗ;
- заміна залізобетонних або металевих опор ЛЗ на дерев'яні в межах підсилюючої ділянки ЛЗ, на якій є небезпечні зближення з ПЛ;
- застосування високовольтного режиму обслуговування ЛЗ;
- ввімкнення редуційних трансформаторів;
- заміна кабелю зв'язку на кабель з підвищеним захистом.

Матеріали для екранів. Для екранів використовують немагнітні (мідь, алюміній) і феромагнітні матеріали. Екрануюча дія немагнітних матеріалів ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0,6 \div 1$) відбувається завдяки магнітним полям, що утворюються віхровими струмами. Постійне магнітне поле при цьому не екранується, а низькочастотне змінне послаблюється мало. Навпаки, електричні поля такими екранами демпфіруються дуже ефективно.

Екрани з феромагнітних матеріалів ($\mu_r \gg 1$, $\sigma_r < 1$) в діапазоні низьких частот послабляють електричні поля гірше, ніж немагнітні, але вони суттєво послабляють постійні магнітні поля.

З підвищенням частоти екрануюча дія електричних і магнітних полів зростає, що витікає з (7.37).

Матеріалами екранів слугують також металева фольга з високою магнітною проникністю, металеві стрічки для кабелів, напилені на пластмасу і скло металеві покриття, комбіновані пластмасові матеріали з металевими порошками та ін.

Споруди з залізною арматурою послаблюють зовнішня поля на 25÷30 дБ.

7.6 Захист ліній зв'язку редуційними трансформаторами

Одним з ефективних засобів захисту ЛЗ від небезпечного впливу ліній високої напруги є використання редуційних трансформаторів (РТ), які в деяких випадках дають значний економічний ефект, порівняно з іншими методами захисту.

Редуційний трансформатор містить два О-подібних магнітопроводи з електротехнічної сталі Е-320 (товщина пластин 0,35 мм), на яких розміщена обмотка. В якості первинної обмотки використовується оболонка (зовнішній провідник) кабелю, а вторинною обмоткою слугують жили (внутрішній провідник) кабелю. На магнітопроводі розміщені дві однакові обмотки, виконані кабелем, – з метою захисту за допомогою одного трансформатора одразу двох кабелів при двохкабельній системі зв'язку. При однокабельній системі зв'язку обмотки трансформатора вмикаються послідовно.

Трансформатор розміщений в сталевому герметичному корпусі, покритому антикорозійною фарбою. Для вводу захищеного кабелю в корпусі зроблені спеціальні отвори.

Принцип дії трансформатора РТ полягає в наступному.

Первинна обмотка вмикається в розріз металевих покрів кабелю, які заземлюються по кінцях захищеної ділянки, а вторинна обмотка – в розріз жил кабелю. При протіканні струму в ланцюгу: металеві покриви-земля, – тобто в первинній обмотці, у вторинній індуктується ЕРС, напрям якої протилежний ЕРС, яка індуктована в жилах кабелю від впливу ліній високої напруги. Таким чином, сумарна ЕРС в жилах кабелю зменшується.

Заважаючий вплив ПЛ на ланцюги ЛЗ виникає при справному стані ПЛ і діє весь час, поки повітряна лінія знаходиться під напругою.

Заважаючі напруги в телефонних каналах тональної частоти створюються електричними полями струмів і напруг ПЛ як основної частоти, так і частот гармонічних складових струмів і напруг ПЛ.

Заважаючі напруги в телефонних каналах високої частоти створюються магнітними і електричними полями струмів і напруг каналів високочастотного зв'язку по проводам ПЛ.

Якщо симетрична трифазна ПЛ с ізольованою нейтраллю залишається в роботі при умовах заземлення однієї з фаз на строк більш, ніж 2 години, то

необхідно визначати заважаючий вплив такої ПЛ при роботі її в цьому режимові.

При розрахунку заважаючих напруг в телефонних ланцюгах ЛЗ від впливу ПЛ з ізольованою нейтраллю, враховується магнітний вплив фазних струмів і електричний вплив фазних напруг ПЛ в нормальному режимі роботи при ширині зближення до 30 м, і тільки магнітний вплив фазних струмів при ширині зближення більшої за 30 м.

При аварійному режимі роботи такої ПЛ враховують електричний вплив фазних напруг. При розрахунках заважаючих впливів в телефонних ланцюгах ЛЗ від ПЛ з заземленою нейтраллю, необхідно враховувати магнітний вплив фазних струмів, струмів нульової послідовності і електричний вплив фазних напруг ПЛ при ширині зближення до 50 м.

При ширині зближення від 50 до 200 м враховується магнітний вплив фазних струмів і струмів нульової послідовності.

При ширині зближення більше 200 м враховують тільки магнітний вплив струмів нульової послідовності.

Спеціальні засоби захисту від впливу полів. До спеціальних засобів захисту ПЛ відносяться заборона режиму роботи по системі два проводи–земля або провід–земля.

До спеціальних засобів захисту ЛЗ відносять:

- часткова або повна заміна повітряних ЛЗ на кабельні, що дозволяє повністю виключити електричний вплив на ділянках кабелювання, знизити напругу перешкод від магнітного впливу у відповідності з коефіцієнтом екранування оболонки і броні кабелю, а також не враховувати можливість впливу високочастотних каналів зв'язку по ПЛ на ВЧ канали по ланцюгам ЛЗ, які працюють в співпадаючому спектрі частот;

- застосування кабелів із спеціальною оболонкою і бронею, які забезпечують підвищене екранування;

- зміну профілю ЛЗ з крюкового на траверсний;

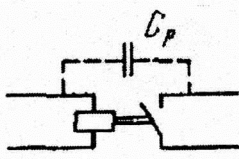
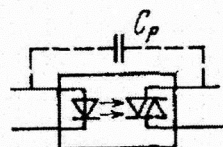
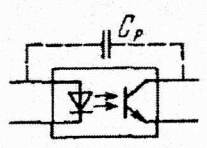
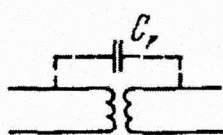
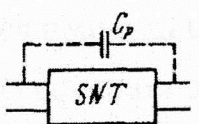
- відмову від каналу тональної частоти і заміна їх ВЧ каналами;

- використання в телефонних каналах спеціальних пристроїв, які дають змогу знизити ефективність впливу перешкод на корисний сигнал в 3÷4 рази; використання на кабельних ЛЗ редуційних і інших трансформаторів.

7.7 Застосування роздільних елементів

Розділяючи елементи використовують для гальванічної розв'язки зовнішніх і внутрішніх струмових контурів з різницею потенціалів до декілька кіловольт (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Роздільні елементи гальванічної розв'язки

Роздільний елемент	Позначення на схемі	Ємність зв'язку C_p	Час затримки
Електромеханічне реле		До 5 пФ	0,5÷20 мс
Оптичний зв'язок		До 1 пФ	$10^{-4} \div 0,5$ мс
Твердотільне реле		5÷10 пФ	8÷10 мс
Розділяючий трансформатор		10÷100 пФ	—
Розділюючі схеми		До 1000 пФ	—

Це необхідно, якщо електронні системи автоматизації та програмного управління, комп'ютерні та процесорні системи містять вхідні інформаційні проводи і мають вихідні потенціальні кабелі управління, тому виникає небезпека порушення функціонування системи, завдяки можливому виникненню синфазних напруг перешкод при кабельному з'єднанні елементів системи.

Ефективним заходом протидії такої небезпеки є гальванічна розв'язка зовнішніх і внутрішніх струмових контурів, для чого використовують різні розділюючі елементи. Ефективність такого розділення визначається паразитною ємністю C_p елемента, яка виникає при паралельному розташуванні вхідних і вихідних проводів. Для процесу ефективного розділення вона повинна бути по-можливості мінімальною, що досягається раціональним вибором схеми системи живлення і управління.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Харлов Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учеб. пособие / Н. Н. Харлов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
2. Нестеров С. В. Методические указания по выполнению расчетно-графической работы по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» / С. В. Нестеров. – Новосибирск : НГТУ, 2011 г.
3. Электромагнитная совместимость. Пер. с нем. В. Д. Мазина и С. А. Спектора. 2-е изд., перераб и доп./под. ред. И. П. Кужекина. – М. : Энергоатомиздат, 1998, 480 с.
4. Электромагнитная совместимость. Основы обеспечения её в технике. пер. с нем. И. П. Кужекин / под. ред.. Б. К. Макимова. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат 1994. – 360 с.
6. Шапиро Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л.-Энергия. – 1978. – 275 с.
7. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств // Вып 1. / Д. Уайт. – Сов. радио., 1979. – 125 с.
8. ГОСТ 2928–92 (МЕК 1000-4-92) Совместимость технических средств – электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Общие положения. – М. : Госстандарт. – 1992. – 42 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Поняття землі і маси

Необхідно чітко розділяти поняття заземлення – для захисту персоналу від неприпустимо високих напруг на корпусах обладнання при пробії ізоляції, та маси – системи опорного потенціалу електричних контурів. Земля і маса, звичайно в одній точці гальванічно з'єднані, але вони відрізняються тим, що проводи заземлення проводять струм тільки при аварії, а «нульові проводи» – в нормальній робочій ситуації і часто представляють собою загальний зворотній провід декількох сигнальних контурів, що ведуть до джерела.

Таким чином вони характеризуються такими поняттями:

Земля	Маса
Заземлення	Маса схеми
Захисний провід	Нейтральний провід
Заземлений корпус	Нульова точка
Захисне заземлення	Сигнальна маса

Отже, захисний заземлюючий провід в нормальному режимі струму не проводить і його потенціал дорівнює потенціалу землі.

По нейтральному проводу в нормальному режимі протікає зворотній струм електроприймачів і його потенціал, внаслідок падіння напруги на його опорі, відрізняється від потенціалу землі (рис. 7.33).

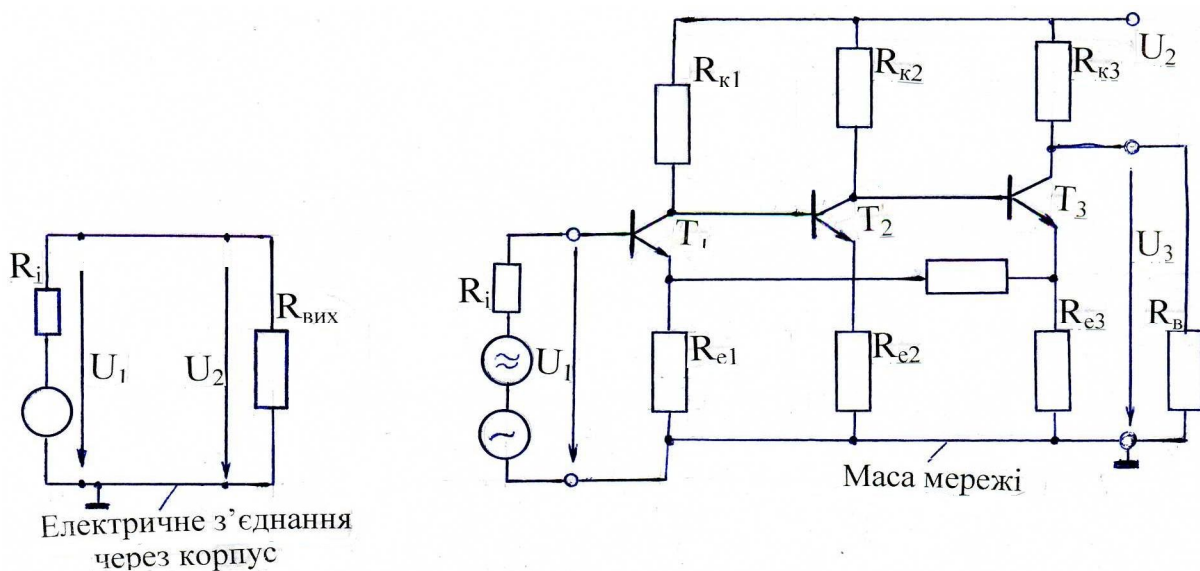


Рисунок 7.33 – Поняття «маси» електричного контуру

ПРОТОКОЛ № 1

Додаток Б

Імпульсні перешкоди, обумовлені збільшенням потенціалу заземлювача

Пристрій (термінал)	Вид мережі	Облад- нання	Вимірювання			Перерахунок до реальних		Доп. рівень	Вис- новки
			Струм, А генератор	Напруга термінала	f , МГц	КЗ, кА	Нап- руга	2,5 кВ	Норм
Термінал РЗА	ТН	ТН	2,3	0,6 В	1	3,5	0,9кВ	2,5 кВ	Норм
	ТН	ТН	4,2	0,9 В	0,5	3,5	0,7кВ	2,5 кВ	Норм
	ТН	ТН	3,8	0,7 В	0,5	3,5	0,6кВ	2,5 кВ	Норм
Термінали	ТН	ТН	2,8	0,6 В	0,5	1,5	0,3кВ	2,5 кВ	Норм
	ТН	ТН	1,3	0,3 В	0,5	1,5	0,3кВ	2,5 кВ	Норм
	ТН	ТН	2,0	0,4 В	0,5	1,5	0,3кВ	2,5 кВ	Норм

ПРОТОКОЛ № 2

Додаток В

Вплив струмів і напруг промислової частоти на контрольні кабелі

№ кабелю	Траса	Місце впливу	Напруга на кабелі, кВ	Струм в екрані кабелю	Термін дії, с	Допуст. значення $U_{50Гц}$, кВ	Допуст. значення $I_{50Гц}$, А	Висновки
ОРУ 220 кВ (струм КЗ 12,9 кА)								
—	ОРУ- 220 кВ- РЩ 220 кВ	Облад- нання ОРУ- 220 кВ	4,5	1250	0,1	1	230	Напруги і струми вищі за норму
ОРУ 500 кВ (струм КЗ 7,2 кА)								
—	ОРУ- 500 кВ- РЩ 500 кВ	Облад- нання ОРУ- 500 кВ	0,5	120	0,5	1	130	Напруги і струми нижчі за норму

Навчальне видання

**РОЙ Віктор Федорович,
КРАВЧЕНКО Юрій Петрович**

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів денної та заочної форм навчання магістерської програми
та слухачів другої вищої освіти за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2019, поз. 97 Л

Підп. до друку 06.02.2019 Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 5,0

Тираж 50 пр. Зам. №

Виконавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи :

ДК 5328 від 11.04.2017.